www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

JAARGANG 21, 1959, no. 4 blz. 85-120 Verschenen 6 juli 1959

Philips Technisch Tijdschrift

BEHANDELEND TECHNISCHE VRAAGSTUKKEN
SAMENHANGENDE MET DE PRODUKTEN, WERKWIJZEN EN ONDERZOEKINGEN
VAN DE N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

DE INSTRUMENTATIE VOOR EEN SUBKRITISCHE HOMOGENE SUSPENSIEREACTOR

In de laboratoria van de N.V. Keuring van Electrotechnische Materialen, Arnhem („KEMA") wordt onder leiding van prof. dr. J. J. Went — chef van het Speurwerklaboratorium van de KEMA — een kernreactor van een zeer bijzonder type ontwikkeld. Het betreft namelijk een homogene suspensiereactor. Aan een klein, subkritisch model (dat vlak bij de kritische toestand is geweest) zijn vele metingen verricht. De resultaten waren zodanig dat men is overgegaan tot de bouw van een tweede proefmodel, waaraan verschillende chemische processen kunnen worden bestudeerd terwijl een vermogen van enige honderden kW wordt opgewekt.

Het ontwikkelingswerk wordt in opdracht van het Reactor Centrum Nederland verricht door een groep die o.m. uit onderzoekers van de KEMA en van het Reactor Centrum bestaat. De bijbehorende instrumentatie is in nauwe samenwerking tussen deze groep en Philips ontwikkeld, en deels bij de KEMA, deels in het Philipslaboratorium te Eindhoven geconstrueerd.

*In het eerste van de hier volgende reeks artikelen *) zet prof. Went de redenen uiteen die tot dit onderzoek hebben geleid. Het tweede artikel gaat over het meten van niet-kernfysische werkparameters aan een subkritische opstelling. De verdere artikelen, die in een volgend nummer zullen verschijnen, zijn gewijd aan de kernfysische instrumentatie die voor meet- en beveiligingsdoeleinden is geconstrueerd.*

I. MOTIVERING VAN DE KEUS VAN EEN HOMOGENE SUSPENSIEREACTOR

door J. J. WENT **).

621.039.52:621.039.54

Het omzetten van kernenergie in energie van een nuttig bruikbare vorm geschiedt in een kernreactor. Op het belang van dit nieuwe type energiebron, in verband met de slinkende voorraden conventionele brandstoffen waarover de wereld beschikt, zal hier niet nader behoeven te worden ingegaan. Hoewel er momenteel verscheidene kernreactoren van groot vermogen in aanbouw zijn, is het nog geenszins een uitgemaakte zaak, welke van de verschillende principiële mogelijkheden (om van allerlei constructiedetails nog maar te zwijgen) de voorkeur verdient. Onderzoek dienaangaande is dan ook in vele landen in volle gang. Ook Nederland heeft een bijdrage willen leveren. Waarom daarbij de keus is gevallen op een reactor van een zeer ongebruikelijk type — de homogene suspensiereactor — en waarom als eerste stap een subkritische (geen energie leverende) vorm is gekozen, willen wij trachten in dit artikel duidelijk te maken.

Voor de vraag, hoe, zeer in het algemeen, een kernreactor werkt, zij verwezen naar de vele boeken en overzichtsartikelen op dit gebied [1]). Zonder ook maar enigermate volledig te willen zijn, noemen wij van de punten die voor een reactorontwikkeling van belang kunnen zijn, de volgende:

Fysische kwesties:

1) de voorwaarden waaronder de reactor kritisch wordt (d.w.z.: waaronder hij een kettingreactie van kernsplijtingen kan onderhouden);
2) het kinetische gedrag van de reactor;
3) de mate waarin bij de werking van de reactor nieuwe splijtstof kan worden „gekweekt".

*) Deze reeks verschijnt ongeveer gelijktijdig in het tijdschrift Electrotechniek.

**) N.V. KEMA, Arnhem.

[1]) Zie b.v. D. J. Littler en J. F. Raffle, An introduction to reactor physics, Pergamon Press, Londen 1957; S. Glasstone, Sourcebook on atomic energy, MacMillan, Londen 1958. Voor een zeer beknopt overzicht, zie Philips techn. T. **19**, 245 e.v. en 265, 1957.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Technische en chemische kwesties:

1) het rendement en de meerdere of mindere eenvoud van de warmte-extractie uit de reactor;
2) de vorm waarin de splijtstof in de reactor aanwezig is (in een „splijtstofelement" of in een circulerende vloeistof);
3) het veilig bij elkaar houden van de radioactieve splijtingsprodukten;
4) het meer of minder eenvoudig uit de reactor kunnen verwijderen van deze splijtingsprodukten;
5) de problemen betreffende corrosie in de reactor.

Overzicht van de verschillende reactorsystemen

Ter toelichting van de genoemde keus zijn een overzicht en een indeling van de mogelijke reactortypen wenselijk. Hoewel iedere indeling min of meer een subjectief karakter draagt, is voor de volgende beschouwingen de onderstaande indeling van nut.

„Snelle" reactoren en „thermische" reactoren

Allereerst kan men zich de vraag stellen of men wil werken met een „snelle" dan wel met een „thermische" reactor, d.w.z. of men de kernsplijtingen tot stand wil laten komen door „snelle" dan wel door „thermische" neutronen. Snel noemt men de neutronen die de grote kinetische energie van gemiddeld 2 MeV bezitten welke ze bij hun vrijkomen tijdens het splijtingsproces hebben meegekregen. Worden snelle neutronen in een zg. moderator geremd, tot hun snelheid („temperatuur") overeenkomt met de temperatuur van de moderator — d.w.z. bij 300 °K tot ca. 0,025 eV —, dan spreekt men van thermische neutronen. Wat betreft de kans om door een snel of een thermisch neutron te worden gespleten, gedragen de isotopen van uranium, plutonium (Pu) en thorium zich zeer verschillend. Deze kans drukt men uit door de werkzame doorsnede voor splijting, σ_f (index f van „fission"). De gebruikelijke eenheid hiervoor is de barn, $= 10^{-24}$ cm^2. In *tabel I* vindt men de waarden van σ_f vermeld voor een aantal U-, Pu- en Th-isotopen, bij snelle en bij thermische neutronen. De grote doorsnede die ^{235}U, ^{239}Pu en ^{233}U voor thermische neutronen bezitten, maken dat een thermische reactor veel gemakkelijker in de kritische toestand is te brengen dan een snelle. Anderzijds heeft een snelle reactor het voordeel dat er, wanneer een splijtbare kern een snel neutron vangt, gemiddeld een groter aantal nieuwe neutronen vrijkomt. Dit gemiddelde aantal, η, is ook in tabel I opgegeven. Een grote η is gunstig voor het kweken van nieuwe splijtstof, zoals aanstonds nader zal worden uitgewerkt.

Thermische reactoren van het heterogene en van het homogene type, met splijtstof in vaste of in vloeibare vorm

De thermische reactoren kan men op twee manieren in twee groepen onderverdelen. Ten eerste kan men letten op de wijze waarop splijtstof en moderatormateriaal aanwezig zijn, namelijk heterogeen naast elkaar voorkomend of homogeen door elkaar heen gemengd. Dienovereenkomstig spreekt men van heterogene resp. homogene thermische reactoren. Een andere indeling richt zich naar de aggregatietoestand van de splijtstof: deze kan in vaste of in vloeibare vorm aanwezig zijn. Hoewel deze twee indelingen niet parallel behoeven te lopen, zal men toch in de eerste plaats slechts aan de volgende twee combinaties denken:

1) de heterogene thermische reactor met vaste splijtstof, gefixeerd in splijtstofelementen, en
2) de homogene thermische reactor met vloeibare splijtstof, d.w.z. de splijtstof is opgelost of gesuspendeerd in b.v. water (H_2O of D_2O), dat als moderator dient.

Er is echter nog een derde combinatie denkbaar (en ook in ontwikkeling), namelijk die van een heterogene structuur met een vloeibare splijtstof, b.v. een constructie met grafiet als moderator, waardoorheen een oplossing van ^{233}U in gesmolten bismut circuleert (de zg. „liquid-metal fuel reactor").

Het „kweken" van nieuwe splijtstof; de conversiefactor

Voordat we nader ingaan op de voor- en nadelen van de verschillende groepen waarin we zoëven de kernreactoren hebben ingedeeld, willen we in het kort iets meedelen over de te gebruiken splijtstoffen. Dit zal niet alleen de zin van de hoofdindeling in snelle en thermische reactoren verduidelijken, maar

Tabel I. Werkzame doorsnede voor splijting, σ_f, van verschillende splijtstofkernen door thermische en door snelle neutronen, en het gemiddelde aantal nieuwe neutronen, η, per gevangen neutron.

Kern	Thermische neutronen van 0,025 eV (300 °K)		Snelle neutronen van 2 MeV	
	σ_f barn	η	σ_f barn	η
^{235}U	580	2,08	1,3	2,3
^{238}U	0	—	0,5	2,55
^{239}Pu	750	2,06	2,0	2,8
^{232}Th	0	—	0,1	—
^{233}U	530	2,28	2,1	2,4

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

vooral ook de reden waarom ons onderzoek zich heeft geconcentreerd op de homogene thermische reactor met vloeibare splijtstof.

In de natuur komen als splijtbare isotopen voor: ^{238}U en ^{235}U, die men voor 99,3 resp. 0,7% in natuurlijk uraan aantreft, alsmede ^{232}Th, dit laatste in een hoeveelheid die vergelijkbaar is met die van natuurlijk uraan. Hiervan is alleen ^{235}U zowel door thermische als door snelle neutronen splijtbaar (zie tabel I). ^{238}U en ^{232}Th daarentegen zijn alleen door snelle neutronen splijtbaar, en dan nog slechts met zeer kleine kans. Toch mag men hieruit niet concluderen dat ^{238}U en ^{232}Th in een thermische reactor waardeloos zouden zijn. In de reactor kunnen namelijk neutronen in kernen ^{238}U of ^{232}Th gevangen worden, waardoor er instabiele isotopen ontstaan. Deze gaan via een reeks van radioactieve desintegraties onder uitzending van negatieve elektronen (β^--emissie) over in nieuwe splijtbare isotopen, ^{239}Pu resp. ^{233}U, die aldus in de reactor worden „gekweekt" („breeding reactor"):

$$^{238}_{92}U + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{239}_{92}U \xrightarrow[23,5\ \text{min}]{\beta^-} {}^{239}_{93}Np \xrightarrow[2,33\ \text{dag}]{\beta^-} {}^{239}_{94}Pu,$$

$$^{232}_{90}Th + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{233}_{90}Th \xrightarrow[23,5\ \text{min}]{\beta^-} {}^{233}_{91}Pa \xrightarrow[27,4\ \text{dag}]{\beta^-} {}^{233}_{92}U$$

(n = neutron, Np = neptunium, Pa = protactinium; de vermelde tijden zijn de halveringstijden van de β-desintegratie). Deze kweekreacties zijn in de eerste plaats van groot belang omdat een grotere fractie van de geïnvesteerde splijtstof erdoor tot splijting wordt gebracht. Een tweede reden is nog dat de gekweekte splijtstof kan ontstaan in hoeveelheden die, na aftrek van wat de reactor zelf nodig heeft, voldoende zijn om er andere kernreactoren mee te starten.

Kwantitatief wordt het rendement van het kweekproces beschreven door de zg. conversiefactor C: de verhouding van het gemiddelde aantal splijtbare kernen ^{239}Pu of ^{233}U die per seconde uit ^{238}U resp. ^{232}Th worden gevormd, tot het gemiddelde aantal splijtbare kernen ^{235}U, ^{239}Pu of ^{233}U die per seconde verdwijnen. $C = 0{,}80$ b.v. wil zeggen dat de reactor door kweken voor 80% in zijn eigen splijtstofbehoefte voorziet; behalve de gemakkelijk verkrijgbare hoeveelheid „kweekstof" ^{238}U of ^{232}Th, behoeft men dan in principe slechts 20% van de hoeveelheid splijtstof toe te voeren die zonder kweken nodig zou zijn. Bij $C = 1$ dekt het kweekproces de splijtstofbehoefte volkomen, en bij $C > 1$ produceert de reactor een overmaat splijtstof.

Aangezien splijtstoffen veel duurder zijn dan kweekstoffen, zal men in het algemeen eropuit zijn, door kweken zoveel mogelijk splijtstof te besparen, dus te streven naar reactorconstructies met een grote waarde van C. Economisch gezien, heeft dit echter zijn grenzen. In het geval van b.v. een reactor voor een elektrische centrale heeft het drukken van de splijtstofkosten slechts zin zolang deze kosten per geproduceerd kWh een nog aanmerkelijk deel uitmaken van de totale kostprijs van een kWh. Met $C = 0{,}95$ (te investeren splijtstof nog slechts $^1/_{20}$ van de verbruikte hoeveelheid) zal de grens ongeveer zijn bereikt. Het heeft dan dus weinig nut, te streven naar een nog grotere waarde van C, tenzij men zulk een grote waarde zou weten te realiseren — dus de reactor een zo grote overmaat splijtstof zou kunnen doen produceren — dat het de moeite waard werd, dit overschot te gebruiken in andere reactoren.

De waarde van C die men kan bereiken, hangt nauw samen met de grootte van η (zie tabel I). Van de gemiddeld η neutronen die vrijkomen wanneer een splijtstofkern een neutron vangt, dient er in de eerste plaats één om zich op zijn beurt zo in een splijtbare kern te laten vangen dat de kettingreactie in stand wordt gehouden. Het overschot, $\eta - 1$, gaat deels door verschillende oorzaken verloren (lek — d.i. uittreden aan het oppervlak van de reactor — en absorptie in de moderator, in constructiematerialen en eventueel in de gevormde splijtingsprodukten), en is deels beschikbaar voor de conversie van ^{238}U in ^{239}Pu of van ^{232}Th in ^{233}U. Stellen we eens, om de gedachten te bepalen, $C = 1$, dan blijven er voor het compenseren van het lek- en absorptieverlies per splijting nog maar $\eta - 2$ neutronen beschikbaar; dit zal slechts dan voldoende zijn indien η aanzienlijk groter dan 2 is. Gaat men in tabel I na, welke waarden van η voorkomen, dan blijkt het volgende.

1) Voor snelle neutronen is η steeds groter dan voor langzame.
2) Voor snelle neutronen heeft ^{239}Pu verreweg de grootste η, namelijk 2,8.
3) Voor thermische neutronen heeft ^{233}U verreweg de grootste η, namelijk 2,28.
4) Voor thermische neutronen heeft ^{239}Pu een kleine η (= 2,06), en — wat niet uit de tabel te zien is — deze waarde neemt met groter wordende energie van de neutronen snel af. Voor een energie die overeenkomt met 600 °K b.v., is η al aanzienlijk beneden de waarde 2 gedaald.

Hieruit zijn voor ons belangrijke conclusies te trekken, die hieronder zijn opgesomd.

a) Een snelle reactor met ^{239}Pu als splijtstof, gekweekt uit ^{238}U, zal een conversiefactor kunnen bezitten die aanzienlijk groter dan 1 is. Wegens de kleine σ_f van ^{239}Pu voor snelle neu-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

tronen zal men echter, om de reactor kritisch te kunnen maken, binnen in de reactor een grote dichtheid van ^{239}Pu-atomen moeten hebben (*fig. 1*). Hier moet dus sterk verrijkt plutonium aanwezig zijn. Het kweekmateriaal (i.c. ^{238}U) wordt voornamelijk als mantel rondom dit Pu aangebracht; weglekkende neutronen worden dan nuttig in deze kweekmantel gebruikt. Het gekweekte Pu moet van tijd tot tijd chemisch uit de kweekmantel worden afgescheiden en in een geschikte vorm gebracht, alvorens het aan de reactor als splijtstof kan worden toegevoerd.

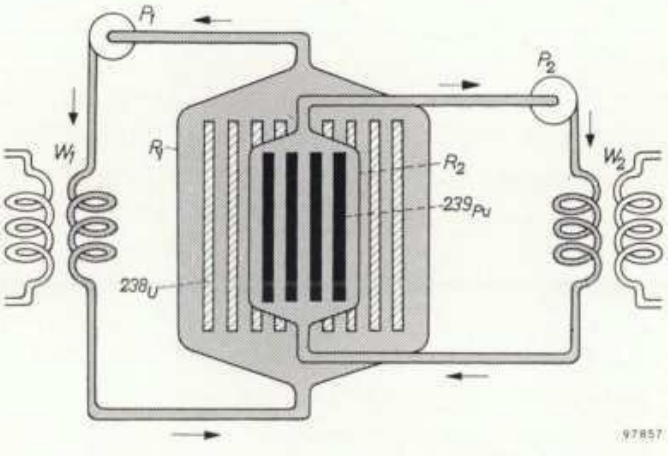


Fig. 1. Schematische doorsnede van een snelle reactor met ^{239}Pu als splijtstof, in de reactor gekweekt uit ^{238}U. R_1 buitenste reactorvat, waarin kweekstofelementen met vast ^{238}U. R_2 binnenste reactorvat, met splijtstofelementen waarin zich vast ^{239}Pu bevindt. Door beide vaten circuleert vloeibaar natrium als koelmedium. P_1, P_2 circulatiepompen. W_1, W_2 warmtewisselaars, die stoom leveren.

b) Een thermische reactor met ^{233}U als splijtstof, gekweekt uit ^{232}Th, zal bij voldoend zuinige neutronenhuishouding een conversiefactor $C = 1$ kunnen bezitten. Wegens de grote werkzame doorsnede van ^{233}U voor splijting door thermische neutronen ($\sigma_f = 530$, zie tabel I) is het mogelijk, zulk een reactor kritisch te maken bij een geringe concentratie van ^{233}U binnen in de reactor. Men kan dus daar tevens de kweekstof aanbrengen. De uit het kweken verkregen splijtstof is dan reeds direct ter plaatse voor splijting beschikbaar. Het chemisch afscheiden en opnieuw toevoeren ervan, zoals bij (a) onvermijdelijk is, komt hier dus te vervallen.

c) Hoewel onder (a) en (b) speciaal is gewezen op het belang van de kweekbare splijtstoffen ^{239}Pu en ^{233}U in snelle resp. thermische reactoren, mag voor de naaste toekomst het belang van ^{235}U niet worden onderschat. Het is immers de enige direct splijtbare splijtstof die in de natuur voorkomt, en daarom vooralsnog de enige uitgangsstof voor ieder kernenergieprogramma.

Indeling van de reactoren naar de grootte van de conversiefactor

Daar de conversiefactor C één van de grootheden is die van invloed zijn op de keus van een bepaald type kernreactor, heeft het ook zin, de reactoren in te delen naar de grootte van C.

1) Reactoren die uitsluitend met sterk verrijkte splijtstoffen werken. Dit type zal men bij voorkeur kiezen voor kleine, mobiele reactoren, waarbij de prijs van de splijtstof niet het eerste punt van overweging is. Aangezien er hier nagenoeg geen kweekmateriaal aanwezig is, zal $C = 0$ of zeer klein zijn.
2) In normale thermische reactoren met ^{235}U en uit ^{238}U gekweekt ^{239}Pu zal C veelal een waarde tussen 0,6 en 0,85 bereiken. Zulk een waarde heeft al duidelijk een gunstige invloed op de splijtstofeconomie.
3) Thermische reactoren die ^{233}U uit ^{232}Th kweken en waarbij de neutroneneconomie tot het uiterste is opgevoerd, zodat C een waarde van 0,9 tot 1,1 bereikt. In zulk een reactor kan een zodanig veelvoud van de oorspronkelijke hoeveelheid splijtstof worden gespleten dat een economisch gebruik van thorium mogelijk is. Mits de aan dit proces verbonden chemische bewerkingskosten niet buitensporig hoog zijn, kunnen de splijtstofkosten zelfs zeer laag worden.
4) Snelle reactoren die ^{239}Pu kweken uit ^{238}U (fig. 1). Hierin kan $C = 1{,}5$ tot 1,8 worden. Zulk een reactor is in staat, een zodanige overmaat ^{239}Pu voort te brengen dat deze overmaat nuttig kan worden gebruikt als splijtstof in andere (snelle of thermische) reactoren. De praktische uitvoerbaarheid hiervan wordt echter min of meer beperkt door het feit dat het gebruik van Pu in thermische reactoren weinig aanbevelenswaardig is, o.a. wegens de ongunstige waarde van η (zie boven).

Keus van het reactortype

Een belangrijke grootheid bij een kernreactor is de vermenigvuldigingsfactor k van de neutronen, d.i. de verhouding van het aantal neutronen van een „generatie" tot het aantal van de voorafgaande generatie, waarbij de levensduur van een generatie ca. 10^{-3} seconde bedraagt in thermische reactoren, en ca. 10^{-7} seconde in snelle reactoren. De waarde $k = 1$ is vereist voor het juist onderhouden van een kettingreactie. Is $k < 1$, dan neemt het aantal aanwezige neutronen met de tijd af. Is $k > 1$, dan neemt het aantal toe en bezit de reactor een positieve reactiviteit. Deze laatste grootheid is gedefinieerd als $(k-1)/k$.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Bij wijzigingen in de reactiviteit — door onverschillig welke oorzaak — krijgt men te maken met het kinetische gedrag van de reactor. Dit gedrag nu kan principieel bij snelle reactoren grotere moeilijkheden leveren dan bij thermische reactoren. De reactorkinetica staat in nauw verband met de veiligheid. Daar deze vooral in een dicht bevolkt land als Nederland een ernstig punt van overweging vormt, ging onze belangstelling in de eerste plaats uit naar thermische reactoren. Anderzijds is het opvoeren van de splijtstofeconomie in het geheel niet van belang ontbloot, zeker niet in Nederland, dat arm aan splijtstoffen is. Daarom lag het voor de hand, te zoeken naar een thermisch reactortype waarin, met een zo zuinig mogelijk gebruik van de neutronen, uit ^{232}Th de splijtstof ^{233}U wordt gekweekt. Eventueel zou voor het starten gebruik mogen worden gemaakt van ^{235}U of ^{239}Pu.

Voor zulk een reactor zal men de moderator moeten kiezen die de beste is uit een oogpunt van neutroneneconomie. Dit is zwaar water. Daarenboven moet in het inwendige zo min mogelijk constructiemateriaal worden gebruikt dat neutronen absorbeert. Absorptie van neutronen in de splijtingsprodukten en lek van neutronen uit de reactor dienen zo veel mogelijk te worden vermeden.

Al deze verlangens wijzen in de richting van een homogene reactor waarin de splijtstof homogeen in zwaar water is verdeeld. Zo'n reactor behoeft in zijn inwendige geen constructiematerialen te bevatten. Ten behoeve van de warmte-extractie circuleert de homogene reactorinhoud door een uitwendig aangebrachte warmtewisselaar. Deze rechtstreekse energieafvoer uit de vloeibare reactorinhoud kan zeer efficiënt zijn. Hij is evenredig met het (uiteraard begrensde) temperatuurverschil tussen in- en uitlaat, en met de pompsnelheid, die alleen praktisch beperkt is. Een vermogensextractie van 40 MW per m^3 reactorinhoud lijkt zeer goed mogelijk te zijn.

Van het rondpompen kan men nog profijt trekken door de reactorinhoud tevens te laten stromen door een reinigingsinstallatie, die hem van de sterk neutronenabsorberende splijtingsprodukten, zoals ^{135}Xe en ^{149}Sm, zo snel ontdoet dat in deze stoffen slechts weinig neutronen verloren gaan. Bij heterogene reactoren daarentegen blijven de splijtingsprodukten opgesloten in de splijtstofelementen, wat dus een verlies aan neutronen tot gevolg heeft.

Onderlinge vergelijking van homogene en heterogene reactoren

In technologisch opzicht heeft een homogene reactor van het bovenbeschreven type weinig gemeen met de meer gebruikelijke heterogene reactoren. Het voornaamste verschil bestaat wel hierin dat in de homogene reactor niet de dure splijtstofelementen met hun beperkte levensduur voorkomen, waarmee heterogene reactoren moeten zijn uitgerust. Anderzijds hebben deze splijtstofelementen het voordeel dat de gevormde radioactieve splijtingsprodukten erin opgesloten blijven, terwijl bij de homogene reactor deze produkten zich door de vloeistofkringloop verspreiden. Een deel van deze kringloop, namelijk de warmtewisselaar en de circulatiepomp, bevindt zich buiten de eigenlijke reactor. Ter voorkoming van een gevaarlijke verspreiding van de radioactieve stoffen moet de kringloop dus nog beter lekdicht zijn dan de beschermende wand van de splijtstofelementen in een heterogene reactor, die zich geheel binnen de reactor bevinden.

Een ander belangrijk verschil betreft de regeling en de beveiliging. Voor het constant houden van de neutronenflux — en daarmee van het geproduceerde vermogen — moeten heterogene reactoren uitgerust zijn met een regelmechanisme. Dit bestaat dikwijls uit één of meer regelstaven van neutronenabsorberend materiaal (b.v. borium), die in afhankelijkheid van de neutronenflux dieper of minder diep in de reactor worden gestoken. Ook is een beveiligingsmechanisme nodig, om automatisch de reactor stop te zetten wanneer de neutronenflux te snel toeneemt. Dit kan gebeuren door de genoemde of soortgelijke staven (veiligheidsstaven) in de reactor te laten vallen [2]), of ook door met een boriuminjectie de reactor te „vergiftigen". Een belangrijk voordeel van het beschreven homogene reactortype is, dat regel- en veiligheidsstaven daar overbodig zijn. Dit is te danken aan twee omstandigheden. De kernenergie komt in hoofdzaak vrij als kinetische energie van de fragmenten waarin de splijtende atoomkernen uiteenvallen, en deze energie wordt in een homogene reactor rechtstreeks afgegeven aan het water. De eerste gunstige omstandigheid nu is de grote thermische uitzettingscoëfficiënt van water: door het uitzetten kan de modererende werking van het water zoveel afnemen dat dit resulteert in een grote negatieve temperatuurcoëfficiënt van de reactiviteit. Dit is overigens eveneens het geval in heterogene reactoren met water als moderator. In de tweede plaats — en dit geldt uit-

[2]) Zie b.v. M. van Tol, Een meet-, regel- en beveiligingsinstallatie voor een kernreactor van het bassintype, I. Algemene beschrijving, en F. E. L. ten Haaf, G. Klein en F. J. Schijff, Een meet-, regel- en beveiligingsinstallatie voor een kernreactor van het bassintype, II. Nadere beschrijving van enige onderdelen, Philips techn. T. **19**, 253-265 en 289-301, 1957.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

sluitend voor homogene reactoren — werkt deze temperatuurcoëfficiënt prompt, dank zij de vrijwel onmiddellijke energieafgifte van de splijtingsfragmenten aan het water. Een en ander maakt dat de neutronenproduktie door de oplopende temperatuur automatisch wordt geremd.

Ook wat betreft de meeste andere technische kenmerken zijn homogene en heterogene reactoren elkaars tegenpool. *Tabel II* geeft schematisch een vergelijking van beide soorten naar gecompliceerdheid. Zonder aan elk der genoemde punten een bepaalde gewichtsfactor toe te kennen en de meerdere of mindere eenvoud numeriek te waarderen, kan men natuurlijk geen voorkeur voor het ene of het andere type uitspreken. Een juiste beoordeling is slechts mogelijk op grond van ervaring die bij de constructie van en het werken met beide typen is opgedaan, bij voorkeur typen die op zijn minst de grootte van een energieleverende demonstratiereactor („power demonstration reactor") hebben. Heterogene reactoren van deze minimumgrootte bestaan er reeds in vrij aanzienlijk aantal. De constructie van homogene reactoren echter is tot dusverre beperkt gebleven tot slechts heel enkele. Er is dan ook thans nog geen definitief oordeel uit te spreken over het meest wenselijke type voor verschillende praktische gevallen. Met de constructie van de hieronder te bespreken homogene nulpeilreactor (= geen energie leverende reactor) met circulerende splijtstof wordt getracht, een gedeelte van de leemten in onze kennis van homogene reactoren aan te vullen.

Nadere precisering van de homogene reactor met circulerende splijtstof

Het begrip „homogene reactor met circulerende splijtstof" is nog niet volkomen bepaald, zelfs indien men eraan toevoegt dat men ^{233}U kweekt uit ^{232}Th en ten behoeve van een zo groot mogelijke neutroneneconomie zwaar water als moderator gebruikt. De twee belangrijkste vragen die na al deze gegevens nog overblijven, zijn:

1) of de reactor uit een inwendig deel met daaromheen een kweekmantel — dus uit twee zones — zal bestaan, dan wel of hij enkelvoudig zal zijn, en
2) of gebruik zal worden gemaakt van een oplossing dan wel van een suspensie.

Deze twee vragen hangen ten dele met elkaar samen. Beschouwen wij eerst vraag (1).

Een reactor met kweekmantel kan in principe een grotere conversiefactor hebben dan een enkelvoudige reactor. Dit komt niet alleen doordat de kweekmantel aan de weglekkende neutronen weer een nuttige bestemming geeft, maar ook door de eigenschappen van het tussenprodukt ^{233}Pa, dat bij de vorming van ^{233}U uit ^{232}Th ontstaat:

$$\underset{\sigma_c = 7{,}5}{^{232}_{90}\mathrm{Th}} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow \underset{1400}{^{233}_{90}\mathrm{Th}} \xrightarrow[23{,}5\ \mathrm{min}]{\beta^-} \underset{70}{^{233}_{91}\mathrm{Pa}} \xrightarrow[27{,}4\ \mathrm{dag}]{\beta^-} \underset{55\ \mathrm{barn}}{^{233}_{92}\mathrm{U}}\,.$$

^{233}Pa namelijk heeft een grote werkzame doorsnede voor neutronenvangst, σ_c (index c van „capture"): $\sigma_c = 70$ barn, te vergelijken met $\sigma_c = 7{,}5$ barn van ^{232}Th, en de overgang van ^{233}Pa in ^{233}U heeft een halveringstijd van bijna een maand. Gedurende deze

Tabel II. Vergelijking van enkele der belangrijkste problemen bij homogene en heterogene thermische reactoren naar gecompliceerdheid.

Aard van het probleem	Homogene reactor met circulerende splijtstof	Heterogene reactor met gefixeerde splijtstof
Constructie van het inwendige van de reactor	eenvoudig	gecompliceerd
Warmte-extractie	gecompliceerd (lekdichte kringloop)	eenvoudig
Beheersing van de reactiviteit	eenvoudig (negatieve temperatuurcoëfficiënt)	gecompliceerd (regel- en veiligheidsstaven)
Beheersing van de verspreiding der splijtingsprodukten	gecompliceerd (splijtingsprodukten zowel binnen als buiten de reactor)	eenvoudig (splijtingsprodukten gefixeerd in de splijtstofelementen)
Splijtstofelement	eenvoudig (oplossing of suspensie)	gecompliceerd (gefixeerde elementen)
Onderhoud van de installatie	gecompliceerd (gehele kringloop is radioactief)	eenvoudig (sterke radioactiviteit alleen binnen in de reactor)
Chemische behandeling en herbehandeling	eenvoudig	gecompliceerd
Warmte-extractie per m^3 inhoud	zeer groot	matig tot groot
Corrosie	moeilijk probleem	moeilijk probleem

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

relatief lange levensduur van het ^{233}Pa bestaat er dus een aanmerkelijke kans dat deze kernen neutronen vangen. Ze gaan dan over in ^{234}Pa, dat *niet* kan worden omgezet in het splijtbare ^{233}U (splijtbaar,

De zoëven genoemde gecompliceerdheid van reactoren met twee zones moge blijken uit het volgende. Reactoren van dit type moeten voorzien zijn van twee onderling gescheiden koelkringlopen en

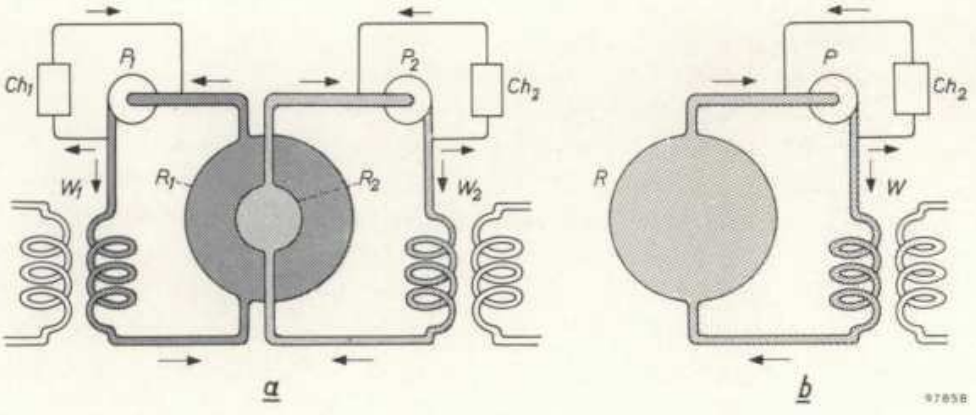


Fig. 2. Schematische voorstelling van twee homogene reactoren.
a) Homogene reactor met twee zones: buitenvat R_1 met een circulerende suspensie van ThO_2 (kweekmantel), binnenvat R_2 met een circulerende oplossing van UO_2SO_4. P_1, P_2 circulatiepompen. W_1, W_2 warmtewisselaars. Ch_1 chemische installatie die 1) ^{233}U en ^{232}Th van elkaar scheidt en het ^{233}U in een geschikte vorm brengt, en 2) corrosie-, erosie- en splijtingsprodukten verwijdert. Ch_2 chemische installatie voor het verwijderen van splijtings-, corrosie- en erosieprodukten.
b) Enkelvoudige homogene reactor, met vat R, circulatiepomp P en warmtewisselaar W. Er circuleert een suspensie van $ThUO_2$ (kweek- en splijtstof) in water. Ch_2 chemische installatie als in (*a*). Een groot voordeel van de enkelvoudige reactor is, dat een chemische installatie zoals Ch_1 in (*a*) niet nodig is.

want hier is $\sigma_f = 530$ barn $\gg \sigma_c$). Behalve van σ_c en de halveringstijd, hangt de kans op de ongewenste vorming van ^{234}Pa af van de neutronenflux ter plaatse, waarmee deze kans evenredig is. Indien men ervoor zorgt dat het ^{233}Pa (en dus ook de kweekstof ^{232}Th) slechts daar in de reactor voorkomt waar de neutronenflux klein is — aan de buitenkant van de reactor dus —, zal het verlies aan ^{233}Pa (en aan neutronen voor de kettingreactie) door vorming van ^{234}Pa klein zijn. Deze overweging zou dus ertoe leiden om de kweekstof ^{232}Th aan te brengen in een mantel, en de splijtstof ^{233}U daarbinnenin, d.w.z. de reactor op te bouwen in twee zones (*fig. 2a*).

De in Nederland in ontwikkeling zijnde reactor is *niet* volgens dit principe opgezet. De redenen hiervoor zijn hoofdzakelijk twee ernstige bezwaren tegen reactoren met twee zones, namelijk dat ze constructief veel gecompliceerder zijn dan enkelvoudige reactoren (vgl. fig. 2*a* met fig. 2*b*) en dat het lang niet zeker is of er voor het binnenvat wel een deugdelijk constructiemateriaal zal zijn te vinden (zie beneden). Het hiertegenover staande voordeel van de grotere conversiefactor is bovendien in ons geval niet zeer gewichtig, aangezien er slechts een relatief geringe verlaging van de kostprijs van een kWh uit zou voortvloeien (het aandeel van de splijtstof in de kostprijs is namelijk relatief al klein).

bovendien van twee verschillende installaties voor chemische behandeling (zie fig. 2*a*). Dit laatste is nodig om de volgende redenen.

a) Uit de kweekmantel moet chemisch zuiver ^{233}U worden afgescheiden, dat daarna, in de juiste vorm gebracht, aan het binnenste van de reactor moet worden toegevoerd, ter vervanging van het verbruikte ^{233}U. Tevens moeten uit de kweekmantel de corrosie- en erosie- en splijtingsprodukten verwijderd kunnen worden (erosie wordt veroorzaakt door de vaste deeltjes van de suspensie). Deze chemische behandelingen zijn niet alleen een onaangename complicatie, maar hebben bovendien een nadelige invloed op de conversiefactor, doordat er onvermijdelijk enig verlies aan ^{233}U mee gepaard gaat en de „effectieve" conversiefactor dus wat kleiner zal zijn dan de „fysische" conversiefactor.

b) Aan het binnenste van de reactor moeten zowel de voor de conversie schadelijke splijtingsprodukten, zoals ^{135}Xe, als de corrosie- en erosieprodukten worden onttrokken.

In een enkelvoudige reactor daarentegen (fig. 2*b*) kan het gekweekte ^{233}U direct, zonder enige tussenstap, aan het splijtingsproces gaan deelnemen. De zojuist onder (a) genoemde chemische hulpinstallatie komt daar dus te vervallen, wat een aanzienlijke vereenvoudiging betekent.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De scheidingswand tussen het inwendige en de kweekmantel van een reactor met twee zones moet uiteraard goed neutronen doorlaten. Tevens moet deze wand bestand zijn tegen een aantal corroderende invloeden, namelijk van de vloeistoffen waarmee hij in aanraking is, en van de temperatuur, de straling, de sterke neutronenflux en het bombardement van splijtingsprodukten waaraan hij blootstaat. Tot dusverre is het beste compromis tussen doorlatend zijn voor neutronen en corrosievastheid een zirconiumlegering die bekend staat als zircaloy. Of dit materiaal onder de bovengenoemde condities voldoende corrosievast zal blijken, moet echter betwijfeld worden.

Eenvoudiger is het, een goed materiaal te vinden voor de wand van een enkelvoudige reactor. Daar vervalt immers de eis dat neutronen moeten worden doorgelaten. Tegen de vooral desastreuze snelle neutronen en energierijke splijtingsprodukten uit de reactor kan men hier de wand beschermen door het tussenplaatsen van een afscherming van neutronenafremmend materiaal (zg. „thermal shield").

Wij komen nu tot de vraag, in welke vorm men de splijtstof moet laten circuleren: als oplossing of als suspensie. Beschouwen we eerst de reactor met twee zones. Deze behoeft in zijn binnenste alleen splijtstof te bevatten, en wel in een zeer lage concentratie (ca. 0,05 vol.-%), omdat daar, met het oog op de ongewenste vorming van ^{234}Pu, liefst geen kweekstof aanwezig moet zijn. Kiest men voor de splijtstof de vorm van in water gesuspendeerde oxydedeeltjes, dan is het, door het grote soortelijke gewicht van deze deeltjes (ca. 10 g/cm^3), moeilijk om bij een lage concentratie in de gehele primaire kringloop een voldoend homogene verdeling te handhaven. Met een oplossing, b.v. van uranylsulfaat (UO_2SO_4) in water, zou de homogeniteit beter te handhaven zijn, althans zolang de temperatuur en de straling niet een precipitatie van de oplossing teweegbrengen. In de kweekmantel daarentegen moet de concentratie aan kweekstof om alle uit het inwendige weglekkende neutronen te absorberen, juist groot zijn (5 tot 10 vol.-%). De in aanmerking komende Th- of U-zouten zijn echter onvoldoende oplosbaar, en bovendien zouden geconcentreerde sulfaatoplossingen een te sterk corroderende werking hebben. In de mantel van een reactor met twee zones zal men dus alleen een suspensie (van oxydedeeltjes) kunnen gebruiken.

Dit laatste is eveneens van toepassing op de enkelvoudige reactor, waarin splijt- en kweekstof gemengd aanwezig zijn (ca. 3 vol.-%).

De vraag „oplossing of suspensie?" kan dus als volgt beantwoord worden: een reactor met twee zones kan waarschijnlijk met een oplossing èn een suspensie werken; een enkelvoudige reactor die ook nieuwe splijtstof produceert, moet met een suspensie werken.

Voor bijzondere doeleinden kan men ook denken aan een enkelvoudige reactor die geen nieuwe splijtstof produceert, d.w.z. die uitsluitend warmte opwekt, zonder dat er conversie in behoeft plaats te vinden. Zo'n reactor — „burner reactor" genoemd — kan met zuiver ^{235}U of ^{239}Pu werken. Op grond van de argumenten die voor het binnenste van een reactor met twee zones zijn aangevoerd, kan men hier een sterk verdunde oplossing gebruiken.

Om de lezer een indruk te geven van de mogelijke afmetingen en van de te investeren hoeveelheden nucleaire stoffen en moderatormaterialen (D_2O), hebben wij in *tabel III* enige globale gegevens verzameld betreffende een „burner reactor", een kweekreactor met twee zones en een enkelvoudige kweekreactor. Uitgegaan is van een maximale warmteproduktie van 440 MW bij een maximale temperatuur van 300 °C, waarmee een elektrisch vermogen van 100 MW kan worden opgewekt. Bij het te investeren nucleaire en moderatormateriaal is rekening gehouden met het noodzakelijke koelcircuit buiten het reactorvat. Als nog niet genoemd voordeel van de reactor met twee zones blijkt uit de tabel dat bij dit type de investering aan nucleair materiaal en zwaar water aanmerkelijk kleiner is dan bij de enkelvoudige reactor. Vooralsnog echter weegt dit voordeel niet op tegen de boven aangehaalde nadelen, evenmin als de grotere conversiefactor dit doet.

Tabel III. Globale vergelijking van drie typen homogene reactoren met circulerende splijtstof. Warmteproduktie 440 MW bij max. 300 °C.

Type reactor	„Burner" reactor met ^{235}U of ^{239}Pu	Kweekreactoren met ^{232}Th		
	1 zone	2 zones		1 zone
		inw.	mantel	
Splijtstof	$^{235}UO_2SO_4$-oplossing	UO_2SO_4		$ThUO_2$
kweekstof	—		ThO_2	
concentratie (gram/liter)	2	6	500-1000	300
conc. splijtstof (vol.-%)	100	100	zeer laag	1,5
diameter vat (m)	3	1,5	3	3,6
conversiefactor C	0	ca. 1,1		ca. 1,0
hoeveelheid D_2O (ton)	30	30		45
hoeveelheid splijtstof (kg)	65	90		200
hoeveelheid kweekstof (ton)	0	11		14

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Stappen ter verwezenlijking van een homogene enkelvoudige suspensiereactor

Toen op grond van bovenstaande overwegingen onze keus was gevallen op een homogene enkelvoudige suspensiereactor, stonden wij voor problemen die in drie groepen te verdelen zijn:

1) Problemen betreffende de stabiliteit van de reactor, ook bij het starten en stoppen.
2) Kwesties met betrekking tot de chemische processen in de reactor en tot de zuivering van de nevencircuits, inclusief het verwijderen van de corrosieprodukten.
3) Algemeen technische en constructieve problemen.

Ter oplossing van de onder (1) genoemde vraagstukken is een kleine subkritische reactor geconstrueerd, die wij verder reactor I zullen noemen en die in de volgende artikelen van deze reeks nog herhaaldelijk ter sprake zal komen. De meetresultaten met reactor I waren bemoedigend, zodat is overgegaan tot de constructie van een tweede kleine reactor (reactor II), die zal worden ingericht voor het leveren van een vermogen van ca. 250 kW. Hierin zullen de onder (2) genoemde processen worden bestudeerd. De derde stap, naar wij hopen, zal zijn de bouw van een prototype van een enkelvoudige suspensiereactor voor groot vermogen.

Reactor I werkt volgens het principe van fig. 2*b*. *Fig. 3* toont dit nog eens, maar bovendien nog een aantal belangrijke details. Door middel van de kraan T_1 kan men een kleiner of groter deel van de rondgepompte suspensie omleiden door de als shunt fungerende buis *Sh* en zo de stroom regelen die door het reactorvat *R* vloeit (de circulatiepomp *P* loopt met constante snelheid). Tevens is in fig. 3 te zien,

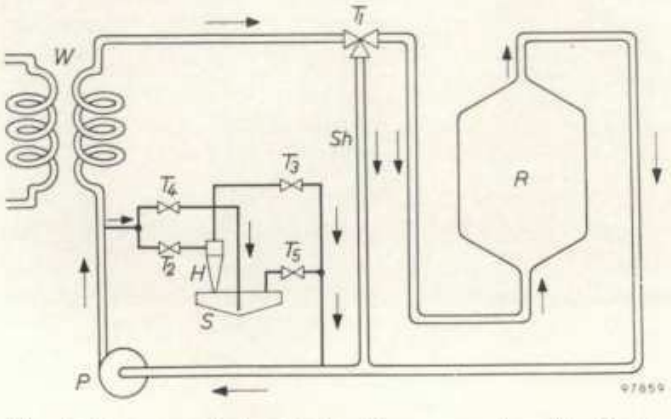


Fig. 3. Vereenvoudigd principeschema van de subkritische suspensiereactor (reactor I) van de KEMA. *R* reactorvat. *P* circulatiepomp. *W* warmtewisselaar (koeler), die zijn warmte via een tussenkringloop aan leidingwater afgeeft. *Sh* shunt over het reactorvat. T_1 regelkraan. *H* hydrocycloon, die, als de kranen T_2 en T_3 open staan, splijtstofdeeltjes uit de suspensie afscheidt. *S* voorraadvat, waarin de afgescheiden splijtstof zich verzamelt. Om splijtstof aan de reactorkringloop toe te voegen, zet men de kranen T_4 en T_5 open.

hoe men de splijtstofconcentratie van de suspensie regelt. Om splijtstof aan de suspensie te onttrekken, opent men de kranen T_2 en T_3. Een deel van de suspensie vloeit dan via T_2 naar een hydrocycloon *H*, waarin door centrifugering de vaste deeltjes uit het water worden afgescheiden. Deze splijtstofdeeltjes verzamelen zich in het voorraadvat *S*, terwijl het water via T_3 in de hoofdkringloop terugkeert. Om splijtstof vanuit het voorraadvat opnieuw in circulatie te brengen, opent men de kranen T_4 en T_5; een waterstraal spuit dan in het voorraadvat en spoelt splijtstofdeeltjes mee naar de hoofdkringloop. Op deze wijze heeft men de splijtstofconcentratie zeer nauwkeurig in de hand.

Fig. 4 toont een registrogram van de neutronenflux Φ in reactor I. Bij *D* werden de kranen T_2 en T_3 (fig. 3) geopend en kwam de hydrocycloon dus in werking. Men ziet dat Φ in weinige minuten afnam tot de beginwaarde Φ_0, die door een uitwendige neutronenbron (zie beneden) werd geleverd.

Van de bovengenoemde problemen zullen wij die betreffende de stabiliteit nu eerst iets uitvoeriger behandelen, en daarna de chemische, technologische en constructieve kwesties zeer in het kort.

De fysische stabiliteit

Boven hebben wij al besproken dat een met water gemodereerde homogene reactor zeer stabiel is, dank zij de grote negatieve temperatuurcoëfficiënt van de reactiviteit en de promptheid waarmee deze functioneert. De reactiviteit wordt dus gereguleerd door een overeenkomstige temperatuurverandering van de reactor. Er is hier derhalve geen regel- en beveiligingsmechanisme nodig; een fysisch grondmechanisme, de thermische uitzetting van water, zorgt voor regeling en beveiliging. Een gevaarlijk thermisch „uit de hand lopen" — zoals mogelijk is bij een heterogene reactor zonder goede regelinrichting — kan hier niet optreden.

Waarmee wèl rekening moet worden gehouden, is, dat een plotselinge overgang naar een hogere evenwichtstemperatuur een voor het reactorvat gevaarlijke drukgolf zou kunnen veroorzaken. Er moest dus worden nagegaan hoe groot en hoe snel de temperatuurvariaties in zulk een reactor maximaal kunnen zijn, zowel onder normale als onder abnormale omstandigheden. Als voorbeeld van een abnormale omstandigheid noemen we het geval dat de circulatie van de reactor plotseling wordt gestopt zonder dat tevoren de splijtstofdeeltjes aan de reactor waren onttrokken. Nog veel grotere moeilijkheden ontstaan wanneer na dit plotseling stoppen de reactor plotseling weer wordt gestart. De verdeling van de deeltjes in de hoofdkringloop namelijk

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

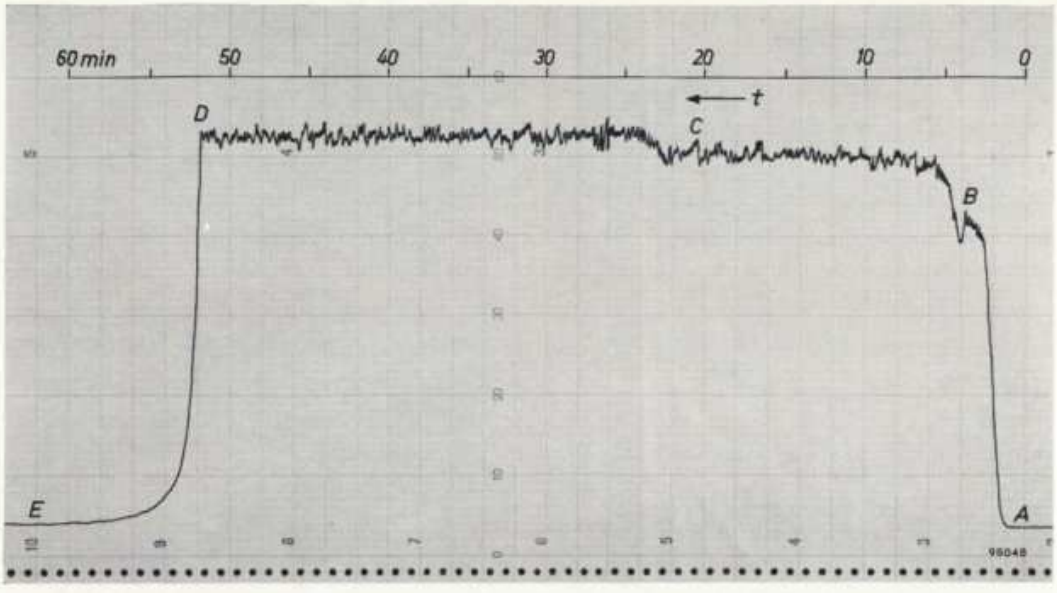


Fig. 4. Registrogram van de neutronenflux Φ in de subkritische reactor van de KEMA, als functie van de tijd t. Rechts van A had Φ de beginwaarde Φ_0, geleverd door een uitwendige neutronenbron; de reactor bevatte hier nog slechts water.

Bij A werden UO_2-deeltjes uit het voorraadvat tot de reactorkringloop toegelaten; Φ nam snel toe als gevolg van de splijtingen van kernen ^{235}U. Bij B werd de verbinding met het voorraadvat even, en bij C definitief gesloten. Bij D kwam de hydrocycloon in werking die splijtstof uit de suspensie verwijdert. Na enkele minuten, bij E, was het reactorvat weer zo ver vrij van splijtstof dat Φ tot de beginwaarde Φ_0 was teruggekeerd. De fluctuaties in de kromme zijn het gevolg van statistische fluctuaties in Φ.

zal dan aanvankelijk sterk heterogeen zijn en pas geleidelijk homogeen worden. Tijdelijke sterke veranderingen in de reactiviteit — dus ook in de neutronenflux — zullen hiervan het gevolg zijn. Een onderzoek hiernaar zal men het liefst uitvoeren door de fluctuaties van de neutronenflux te meten in een reactor die òf ietwat subkritisch is, òf kritisch op een zo laag vermogensniveau dat noch de reactorinhoud sterk radioactief wordt, noch grote temperatuurexcursies mogelijk zijn. In de eerste plaats zal dan namelijk door de uiterst geringe energieproduktie ook zo weinig warmte worden ontwikkeld dat de bovengenoemde stabiliserende werking van temperatuurveranderingen niet tot stand komt; de optredende fluctuaties in de neutronenflux zullen dus relatief des te groter zijn en derhalve des te nauwkeuriger gemeten kunnen worden. In de tweede plaats heeft het nauwelijks radioactief worden o.a. het voordeel dat men, na de reactor te hebben gestopt, gemakkelijk veranderingen in de installatie kan aanbrengen.

Niet alleen is het, om de genoemde redenen, wenselijk, de temperatuurexcursies te beperken: men wil zelfs de temperatuur, als één van de voornaamste werkparameters, nauwkeurig constant houden; dit gebeurt door middel van een elektronische regelaar, die in deel II zal worden besproken.

Bij deze proeven zijn temperatuurveranderingen, met hun stabiliserende werking, dus doelbewust uitgeschakeld. Men zal derhalve moeten omzien naar een ander beveiligingsmiddel, b.v. de normale, boriumhoudende, regel- en veiligheidsstaven. Reactor I is dan ook van drie zulke staven voorzien. Ze zijn aangebracht in de nog ter sprake komende neutronenreflector, die om de reactor heen is geplaatst (*fig. 5*). Door het naar binnen brengen van

Fig. 5. Het reactorvat van KEMA-reactor I. Van de acht verticale buizen dienen de drie lange ter geleiding van de regel- en veiligheidsstaven; de vijf korte bevatten ieder een neutronendetector. De (gedeeltelijk weggenomen) blokken binnen de vier wanden zijn van berylliumoxyde; samen met blokken grafiet buiten deze wanden vormen ze een neutronenreflector. Het reactorvat is van niet-roestend staal. Het heeft een inhoud van 18 liter en een middellijn van 30 cm. Er is een temperatuuropnemer op aangebracht.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

deze staven kan men de reactiviteit maximaal 6% verkleinen.

De neutronenflux mag niet willekeurig klein worden gemaakt, daar men in de neutronenflux ook kortdurende fluctuaties wil meten. In die korte tijd moet men dus een zo groot aantal neutronen hebben geteld dat men geen last meer heeft van de statistische fluctuaties in deze neutronenflux. In het algemeen hebben wij daarom als conditie gesteld dat 40 000 neutronen per seconde gedetecteerd moeten kunnen worden.

Boven is al sprake geweest van metingen in een nog niet kritische toestand. Dit is een toestand waarin de vermenigvuldigingsfactor k kleiner dan 1 is. De neutronenflux kan dan alleen in stand blijven indien men continu neutronen aan het systeem toevoert.

Dit kan gebeuren met behulp van een zg. radium-beryllium-bron, waarin door radium geleverde alfastraling als volgt met beryllium reageert:

$$^{4}_{2}\mathrm{He} + ^{9}_{4}\mathrm{Be} \rightarrow ^{12}_{6}\mathrm{C} + ^{1}_{0}\mathrm{n}\,.$$

Bij een ander soort neutronenbron maakt men gebruik van een versnellingsbuis waarin de reactie

$$^{3}_{1}\mathrm{D} + ^{2}_{1}\mathrm{D} \rightarrow ^{3}_{2}\mathrm{He} + ^{1}_{0}\mathrm{n}$$

optreedt. Reactor I is van beide soorten neutronenbron voorzien.

Stel dat de neutronenbron constant N neutronen per seconde levert. Na n neutronengeneraties zal zich, indien $n \gg 1$, een totale neutronenproduktie (van bron + reactor) hebben ingesteld ter grootte van

$$Nk(1 + k + k^2 + \ldots + k^n) \approx N\frac{k}{1-k}$$

neutronen per seconde.

(Daar één generatie een levensduur van ca. 10^{-3} seconde heeft, is deze toestand na b.v. 0,1 seconde bereikt.) De door deze produktie veroorzaakte neutronenflux kan men nu meten. Verandert k met een bedrag δk, dan zal, bij constante N, het bedrag $Nk/(1-k)$ eveneens veranderen, en wel des te meer naarmate k dichter bij 1 komt [3]). Als men k en ook de fluctuaties van de neutronenflux meet, kan men δk berekenen. Uiteraard moet men ervoor zorgen dat gedurende deze metingen de temperatuur nauwkeurig constant blijft. Bij langzaam oplopen van de temperatuur — als gevolg van b.v. de toegevoerde pompenergie — zou op de gezochte grootheid δk een verandering $\delta' k$ worden gesuperponeerd, die afhangt van de temperatuurstijging en van de negatieve temperatuurcoëfficiënt van de reactiviteit. Als conditie hebben wij gesteld dat de temperatuur binnen $\pm 0{,}1$ °C constant blijft.

Ten slotte nog een opmerking over het bepalen van de reactorcondities (geometrie van de reactor, temperatuur T van de reactorinhoud, concentratie c van de splijtstof in het water) waarbij k precies gelijk aan 1 wordt. Doordat dan $Nk/(1-k)$ oneindig groot is, gaat het bepalen van de gewenste condities betrekkelijk eenvoudig. Zet men, voor constante T, de grootheid $(1-k)/N$ uit als functie van c, dan vindt men een verloop zoals *fig. 6* weergeeft. Uit

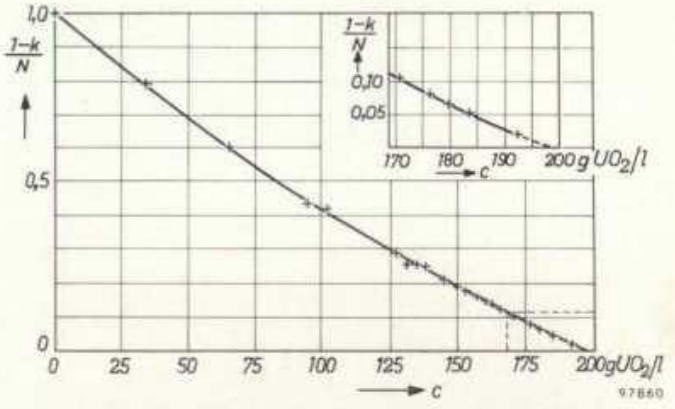


Fig. 6. De grootheid $(1-k)/N$ op relatieve schaal, als functie van de splijtstofconcentratie c, bij constante temperatuur T van de reactorinhoud. Met kruisjes zijn punten aangeduid die gemeten zijn aan KEMA-reactor I bij een bepaalde configuratie van de neutronenbron en de neutronendetector, en bij $T = 25$ °C. Door extrapolatie (zie inzet) vindt men de concentratie c_{kr} die onder deze omstandigheden de reactor kritisch zou maken; hier was $c_{kr} = 198$ gram UO_2 (uranium met 20% ^{235}U) per liter suspensie.

subkritische meetpunten kan men dus door extrapoleren de kritische concentratie c_{kr} bepalen. Uit deze c_{kr} volgt op vrij eenvoudige wijze, hoe groot δk is bij kleine wijzigingen in de concentratie.

De volgende artikelen van deze reeks beschrijven de bij reactor I behorende instrumentatie, die voor het uitvoeren van bovengenoemde metingen is ontwikkeld in samenwerking tussen de werkgroep te Arnhem en het Philipslaboratorium te Eindhoven. De elektronische apparatuur is te zien in *fig. 7*. Om de installatie aan het doel te doen beantwoorden, moest voldaan zijn aan o.a. de volgende condities:

a) Reactor I moet voorzien zijn van regel- en veiligheidsstaven.
b) De temperatuur van de reactorinhoud moet in het gebied van 20 tot 80 °C automatisch binnen $\pm 0{,}1$ °C constant kunnen worden gehouden.
c) De uitwendige neutronenbron moet enerzijds in staat zijn om zo veel neutronen per seconde te

[3]) Wij laten hier de invloed van de zg. vertraagde neutronen geheel buiten beschouwing. Dit is evenwel niet geoorloofd indien k de waarde 1 dicht nadert. De vertraagde neutronen (ca. 0,7% van het totale aantal dat vrijkomt) bezitten namelijk schijnbaar een veel langere levensduur (ca. 10 seconden) dan de „prompte" neutronen (ca. 10^{-3} s).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

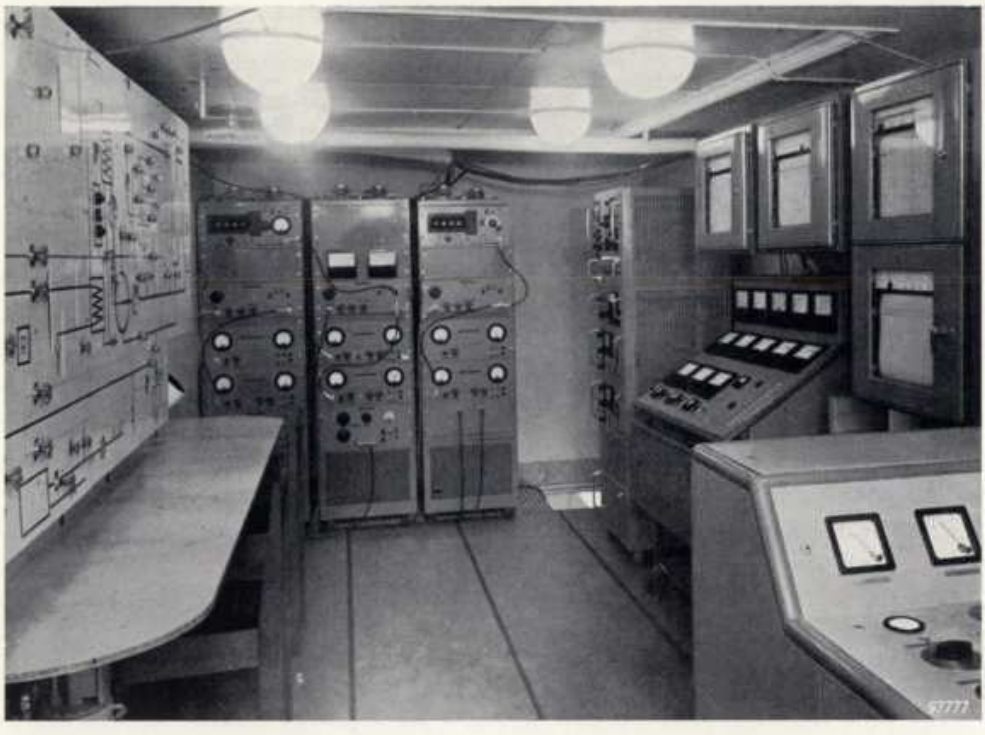


Fig. 7. Het elektronische gedeelte van de instrumentatie van KEMA-reactor I. Links: schema van de installatie. Achtergrond: neutronentellers. Rechts achter: temperatuurregelaar, neutronenfluxmeters en apparatuur voor de regel- en veiligheidsstaven. Meer naar voren: meters die de volgende grootheden registreren: de temperatuur en de concentratie van de suspensie in het reactorvat, de suspensiestroom (in m^3/h), en de temperatuur van het koelwater. Rechts vooraan: bedieningstafel van de versnellingsbuis van één der neutronenbronnen.

leveren dat de neutronendetectoren, bij afwezigheid van splijtstof, reeds 40 000 neutronen per seconde in de detector tellen. Anderzijds moet de bron ook zo zwak gemaakt kunnen worden dat $Nk/(1-k)$ niet te groot wordt, ondanks een grote waarde van $k/(1-k)$.

d) De neutronendetectoren met hun elektronische hulpapparatuur moeten ook ver boven de genoemde waarde van 40 000 neutronen per seconde nog lineair werken.

e) Men moet de concentratie van de suspensie continu kunnen meten en ook continu kunnen variëren.

De chemische processen in de reactor en de zuivering van de nevencircuits

Vele chemische processen die zich in een suspensiereactor afspelen, kunnen even goed worden onderzocht in een kleine reactor als in een grote, mits in beide de temperatuur, de stralingscondities en de suspensie-eigenschappen (zoals de volumeconcentratie en de eigenschappen der deeltjes) voldoende weinig verschillen. De instelling van de werktemperatuur vindt plaats door instelling van de concentratie der suspensie. Gelijke stralingsomstandigheden zijn te verwezenlijken als men ervoor zorgt dat de kleine reactor per volume-eenheid hetzelfde vermogen produceert als de grote, dus dat er per seconde en per cm^3 evenveel splijtingen plaatsvinden. De instelling van het vermogen geschiedt door middel van de warmte-extractie uit de warmtewisselaar (fig. 2*b*). Daarenboven is het wenselijk dat de volumeconcentraties van splijtstof en van kweekstof in de kleine reactor even groot zijn als in de grote. Aan deze voorwaarde is te voldoen indien men vrij kan beschikken over de verhouding van de aantallen splijtbare atomen en kweekstofatomen.

Onder de omstandigheden die in een reactor van groot vermogen heersen, kan men aldus in een kleine „procesreactor" o.a. het volgende bestuderen: de ontleding van het water, de colloïd-chemische stabiliteit van de suspensie zowel als de mechanische stabiliteit van de suspensiedeeltjes onder invloed van de splijtingen die erin optreden, de verwijdering van de gevormde splijtingsprodukten in reinigingscircuits en de verwijdering van corrosie- en erosieprodukten.

Voor het onderzoek van deze processen wordt bij de KEMA dan ook een kleine procesreactor (reactor II) geconstrueerd, zo klein als uit een oogpunt van reactiviteit mogelijk is. Dat er een benedengrens

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

aan het volume van het reactorvat bestaat, volgt uit het feit dat bij gelijkvormig verkleinen van het vat de oppervlakte minder snel afneemt dan het volume; de neutronenlek neemt relatief dus toe en zou ten slotte ontoelaatbaar groot worden. Men kan de benedengrens van de afmetingen verlagen door de toenemende neutronenlek min of meer te compenseren. Daartoe is bij reactor I het vat omgeven door een neutronenreflector van goed modererend materiaal: een laag berylliumoxyde met daaromheen een laag grafiet (fig. 5). Door bovendien verrijkte splijtstof te gebruiken (20% ^{235}U), kon worden volstaan met een volume van 18 liter. Bij deze zeer kleine afmetingen blijkt dat de minimumhoeveelheid splijtstof waarmee de reactor nog kritisch te maken is, kleiner is indien men als moderator gewoon water gebruikt in plaats van zwaar water. Reactor I werkt dan ook met een suspensie van uraniumoxyde (het oxyde UO_2) in gewoon water. Dit zal ook het geval zijn bij reactor II, daar het voor het onderzoek van de genoemde processen nagenoeg geen verschil maakt, welke soort water men gebruikt.

De conversiefactor van reactor II kan niet groot zijn. Het doel is ook niet met deze reactor een grote conversiefactor te verkrijgen, maar om kwantitatief de processen te bestuderen die door optimalisatie een grote conversiefactor zullen kunnen opleveren in een vermogensreactor.

De algemene technologische en constructieve problemen

Niet minder belangrijk zijn de technologische en constructieve problemen. Deze behoeven in het kader van dit artikel echter slechts kort te worden besproken.

In het onderhavige type reactor circuleert een uitzonderlijk sterk radioactieve vloeistof, en bovendien maken de (hier overigens buiten beschouwing blijvende) vertraagde neutronen het materiaal van de gehele primaire kringloop radioactief. Daardoor krijgt men te maken met twee groepen van problemen die bij een reactor zonder circulerende splijtstof in veel mindere mate bestaan.

In de eerste plaats zal men ervoor moeten zorgen dat alle onderdelen van het reactorsysteem — pompen, afsluiters, enz. — absoluut en blijvend lekdicht zijn. Ten tweede is er de kwestie van het onderhoud. Voor een normale elektrische centrale rekent men op een levensduur van 20 jaar. Geen enkele technische installatie met een dergelijke levensduur is denkbaar indien er niet tussentijds onderhoud mogelijk is. Een kernreactor moet dus zo zijn geconstrueerd dat men er het noodzakelijke onderhoud — uiteraard met afstandsbediening — aan kan verrichten.

De in aanbouw zijnde procesreactor (II) zal voor beide problemen belangrijke informaties moeten, en ook kunnen, verschaffen. Volledig zal deze informatie echter niet zijn. Men zal het niet kunnen stellen zonder ervaring met onderdelen op de schaal van een vermogensreactor en zonder ervaring omtrent de onderhoudskosten van zulk een reactor. Daarom zal, als derde stap van ons ontwikkelingsprogram, een prototype van een vermogensreactor moeten worden geconstrueerd. Dat dit een zeer kostbare stap zal zijn, behoeft wel geen nader betoog.

Samenvatting. Bij de KEMA te Arnhem wordt in opdracht van het Reactor Centrum Nederland en onder leiding van de auteur gewerkt aan de ontwikkeling van een kernreactor van bijzonder type: de enkelvoudige homogene suspensiereactor. In het artikel worden de kernreactoren verdeeld in snelle en thermische, deze laatste onderverdeeld in heterogene en homogene reactoren. Daarna komt het kweken („breeding") van nieuwe splijtbare stoffen (^{239}Pu, ^{233}U) uit kweekstoffen (^{238}U resp. ^{232}Th) ter sprake. Het rendement van het kweekproces komt tot uitdrukking in de conversiefactor. Een indeling wordt gegeven van de reactoren naar de grootte van de conversiefactor.

Overwegingen van veiligheid en splijtstofeconomie wijzen voor een dicht bevolkt en splijtstofarm land als Nederland in de richting van de homogene reactor met circulerende splijtstof. Daarbij heeft men nog de keus tussen een reactor met twee zones (splijtstof in de binnenste zone, kweekstof als mantel daaromheen) en een enkelvoudige reactor (splijtstof en kweekstof gemengd). Deze laatste heeft de voorkeur gekregen, voornamelijk omdat hij minder gecompliceerd is. Als circulerende vloeistof is gekozen een suspensie van ThO_2-deeltjes die wat UO_2 bevatten, in zwaar water, dat tevens als moderator dient; de splijtstof is ^{233}U, in de reactor zelf gekweekt uit ^{232}Th.

De eerste stap van het ontwikkelingsprogram is geweest de constructie van zulk een reactor op kleine schaal voor experimenten in subkritische (deels bijna kritische) toestand. De neutronenflux wordt in stand gehouden door een uitwendige neutronenbron. De circulerende vloeistof is hier een suspensie van UO_2 (uranium met 20% ^{235}U) in gewoon water. Bepaald is o.a. de splijtstofconcentratie waarbij de reactor kritisch wordt. Als tweede stap is een soortgelijke reactor in aanbouw (een procesreactor), die 250 kW zal kunnen leveren en waaraan verschillende chemische processen zullen worden bestudeerd onder omstandigheden zoals in een grote vermogensreactor voorkomen. De derde stap zal zijn de bouw van een prototype van een homogene suspensiereactor voor groot vermogen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

DE INSTRUMENTATIE VOOR EEN SUBKRITISCHE HOMOGENE SUSPENSIEREACTOR

II. METING EN REGELING VAN WERKPARAMETERS

door B. L. A. van der SCHEE *) en M. van TOL.

621.039.524.46-53:621.039.524.46-79

Bij de experimenten met de subkritische suspensiereactor die zich in een der laboratoria van de N.V. KEMA te Arnhem bevindt [1]), moet men de temperatuur in het reactorvat rigoureus constant kunnen houden (variaties $< 0{,}1$ °C) op iedere gewenste waarde tussen kamertemperatuur en 100 °C. Verder is het noodzakelijk dat men een aantal werkparameters kan meten. De voornaamste hiervan zijn: de temperatuur van de vloeistof in het reactorvat, de concentratie van de suspensie in het reactorvat, en de snelheid waarmee de suspensie in het reactorcircuit wordt rondgepompt. In dit artikel bespreken we achtereenvolgens afzonderlijk de regelapparatuur die zorgt voor het constant houden van de temperatuur [2]), de apparatuur voor het meten van de concentratie en die voor het meten van de stroomsnelheid. Ten slotte geven we een overzicht van de gehele reactoropstelling met alle meet- en regelorganen (behalve de apparatuur voor het meten van de neutronenflux en die welke de regelstaven bedient).

Het instellen en constant houden van de temperatuur

Bij het ontwerpen van de regelinstallatie die de temperatuur constant houdt, moest behalve met de toegelaten maximumafwijking van de temperatuur, rekening gehouden worden met het feit dat de pomp die de suspensie in het reactorcircuit rondpompt, een vermogen van 3 tot 7 kW aan de vloeistof toevoert. Dit betekent dat men zelfs bij de hoogste (beneden het kookpunt gelegen) werktemperatuur enigszins moet koelen om de temperatuur constant te doen zijn. De werktemperatuur wordt bepaald door de mate waarin er gekoeld wordt. De stabilisatie van de temperatuur tegen variaties van het door de pomp gedissipeerde vermogen en dergelijke, geschiedt nu door wat sterker te koelen dan nodig is en dit teveel te compenseren met behulp van een regelbaar verwarmingselement, dat zijn warmte rechtstreeks afgeeft aan de suspensie. Dit verwarmingselement wordt bestuurd door een thermometer die de temperatuur van de suspensie meet. Deze wijze van stabilisatie is sneller en gevoeliger dan een waarbij men het koelvermogen varieert. In de evenwichtstoestand geeft de verhitter ongeveer de helft van zijn maximumvermogen (5 kW) af, zodat variaties van ruim 2 kW in het af te voeren vermogen opgevangen kunnen worden.

Een schematische voorstelling van het geheel vindt men in *fig. 1*. Men ziet daarin o.a. dat de koeling in twee trappen geschiedt. Tussen de koelleiding, waardoor leidingwater stroomt dat wegvloeit naar de riolering (d.w.z. uiteindelijk naar de Rijn), en het reactorcircuit bevindt zich nog een gesloten koelcircuit. Hierdoor is het onmogelijk dat radioactieve stoffen in de rivier terechtkomen. Het gesloten circuit noemen we het primaire, het andere het secundaire.

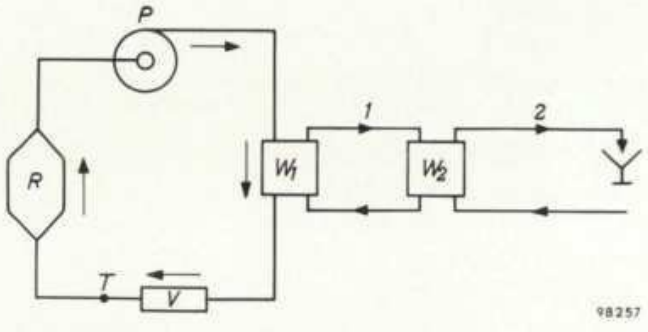


Fig. 1. Schematische voorstelling van het reactorcircuit met het primaire (*1*) en secundaire (*2*) koelcircuit. *P* pomp, *R* reactorvat, *V* verhitter, W_1 primaire koeler, W_2 secundaire koeler. *T* thermometer van de regelapparatuur.

Verder zal men opmerken dat de thermometer die de regelapparatuur bestuurt, zich niet bevindt in het reactorvat — om welks temperatuur het toch immers gaat! — maar in het leidinggedeelte tussen het reactorvat en de verhitter. Aan de keus van deze plaats liggen de volgende overwegingen ten grondslag. Door het relatief grote volume van het reactorvat is het tijdinterval tussen het ogenblik waarop de verhitter te veel (of te weinig) warmte

*) R.C.N.-KEMA-werkgroep, Arnhem.

[1]) J. J. Went, De instrumentatie voor een subkritische homogene suspensiereactor, I. Motivering van de keus van een homogene suspensiereactor, Philips techn. T. **21**, 85-97, 1959 (no. 4).

[2]) Ontworpen en geleverd door Philips.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

gaat produceren, en het ogenblik waarop een in dat vat geplaatste thermometer dat zou gaan „bemerken", vrij lang. De stroomsnelheid in het vat is gering en op een flinke menging van de inhoud ervan kan men niet steeds rekenen. Men kan uiteraard deze tijd verkorten door te roeren — men beperkt het tijdinterval dan nagenoeg tot de looptijd van de vloeistof door het buisgedeelte tussen de verhitter en het reactorvat — en verder nog wat door een zeer gevoelige thermometer te gebruiken (of de versterking in de regelkring groot te maken), maar ook dan zal het tijdinterval toch nog vrij lang zijn. De combinatie van een lange looptijd en een grote versterking in de regelkring kan gemakkelijk resulteren in een onstabiliteit van deze kring. Door de thermometer direct achter de verhitter te plaatsen, verkrijgt men een zo korte looptijd dat de regeling gemakkelijk stabiel te houden is.

Het feit dat niet de temperatuur in het reactorvat constant gehouden wordt, maar die aan de uitgang van de verhitter, is in de omstandigheden waaronder hier gewerkt wordt, niet bezwaarlijk. In de eerste plaats verblijft de suspensie kort genoeg in het reactorvat om niet in hinderlijke mate af te koelen — de vloeistof wordt per minuut 2 tot 4× rondgepompt — en in de tweede plaats wordt er bij een subkritisch experiment in het reactorvat door de kernreacties zo goed als geen energie opgewekt.

In zeker opzicht is het zelfs van voordeel om de thermometer vóór het reactorvat te plaatsen. Doordat er in dit vat een zekere warmteuitwisseling plaatsvindt en de warmtecapaciteit van de gehele inhoud relatief groot is, hebben snelle periodieke variaties van de temperatuur van de binnenkomende vloeistof nagenoeg geen invloed op de gemiddelde temperatuur in het vat. Dit betekent dat de regelkring (thans dus bestaande uit: kort stuk leiding, thermometer, apparatuur via welke de thermometer de verhitter bestuurt) niet kritisch gedempt behoeft te zijn; een eventueel uitslingerverschijnsel beïnvloedt de temperatuur in het vat vrijwel niet. Indien het reactorvat zelf wel deel zou uitmaken van de regelkring, zou een kritische demping wèl noodzakelijk zijn.

Uit het voorgaande valt o.m. te concluderen dat de regelinstallatie niet méér behoeft te presteren dan het opvangen van de variaties in het door de pomp in de vloeistof gedissipeerde vermogen en de variaties in het door de koeler onttrokken vermogen (die een gevolg zijn van temperatuurvariaties van het secundaire koelwater). Deze variaties verlopen altijd langzaam en veroorzaken in het reactorcircuit een temperatuurverandering van ten hoogste enkele tiende graden per uur. De storingen die weggeregeld moeten worden, zijn dus deze langzame temperatuurfluctuaties van het de verhitter binnenstromende water. Het vermogen van de verhitter behoeft daartoe niet sterker gevarieerd te kunnen worden dan van 0 tot 5 kW. Alleen als de temperatuur van het koelwater gedurende een gehele werkdag blijft stijgen of dalen, kan het gebeuren dat de variatiemogelijkheid van het verhittervermogen te gering is. Men moet dan dus op den duur de stand van de koelwaterkraan veranderen. Dit doet aan de bruikbaarheid van de regelapparatuur nauwelijks iets af. Men heeft voor een dergelijk ingrijpen ruimschoots de tijd en bovendien is het slechts zelden nodig.

In principe zou men zelfs met een veel kleiner vermogen (b.v. 2 kW) kunnen volstaan. Daar de verhitter echter, behalve voor de regeling, óók gebruikt wordt voor het opwarmen van de suspensie dat aan een experiment bij hoge temperatuur uiteraard vooraf moet gaan, is als maximumvermogen van de verhitter de genoemde 5 kW gekozen. De relatief grote variatiemogelijkheid van het verhittervermogen maakt verder ook dat de instelling van het koelvermogen minder nauw luistert.

De temperatuurverschillen die met het pomp-, het koel- en het regelvermogen corresponderen, hangen uiteraard af van de hoeveelheid suspensie die per tijdseenheid door een doorsnee stroomt. Onder normale omstandigheden is dit 7,5 m^3 per uur. De pomp voert dan een vermogen van ca. 5 kW toe, de verhitter gemiddeld $2^1/_2$ kW (maximaal 5 kW), tezamen 7,5 kW. Dit betekent dat het temperatuurverschil tussen de ingang en de uitgang van de koeler ca. 1 °C bedraagt; het temperatuurverschil tussen ingang en uitgang van de verhitter is dan ten hoogste 0,7 °C.

De regelapparatuur

Het verhitten van de suspensie geschiedt eenvoudig door een elektrische stroom te doen vloeien door een deel van de roestvrij stalen pijpleiding die tezamen met het reactorvat het reactorcircuit vormt. Deze methode heeft het voordeel dat men in de pijpwand geen doorvoeren behoeft aan te brengen. De lengte van het pijpstuk dat als verwarmingselement fungeert, is ca. 1 meter en de inwendige diameter 32 mm. De elektrische weerstand ervan is $1{,}4 \times 10^{-3}$ Ω. Dit betekent dat er voor een warmteproduktie van 5 kW een stroom van 1900 A door de pijpwand moet vloeien. Deze stroom wordt verkregen met behulp van een speciale transformator (primaire spanning 220 V; secundaire spanning 3,5 V; secundaire stroom maximaal 2500 A). De secundaire wikkeling is via flexibele koperbanden en hardgesoldeerde koperen blokken verbonden met de uiteinden van het juistgenoemde pijpstuk (*fig. 2*).

Het regelen van de warmteproduktie van de verhitter geschiedt door variatie van de primaire

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

stroom van de transformator, en wel tussen 0 en 32 A. Deze stroom vloeit daartoe door een antiparallelschakeling van twee thyratrons PL 260, welker ontstekingstijdstip varieert met de vloeistoftemperatuur (*fig. 3*).

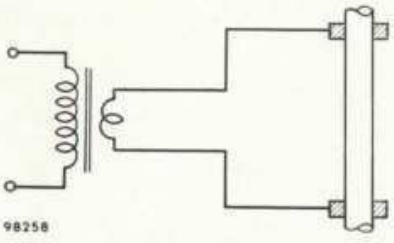


Fig. 2. De verhitting geschiedt doordat de secundaire stroom van een transformator (max. 2500 A) door de wand van een pijpstuk vloeit dat deel uitmaakt van het reactorcircuit. De transformator is met de pijp verbonden door aan koperen blokken gesoldeerd flexibel koperband.

Het ontsteken van de buizen geschiedt door middel van een spanningsimpuls die aan het rooster wordt toegevoerd en die gesuperponeerd wordt op een permanent aanwezige spanning die de buizen bij

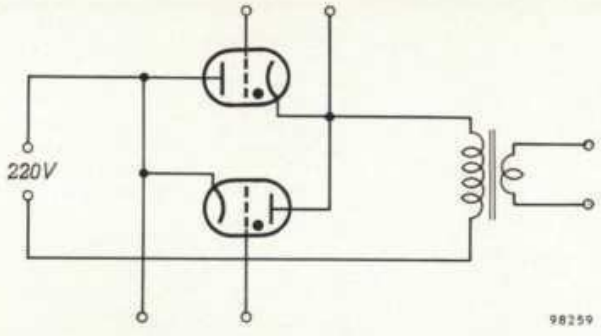


Fig. 3. Primaire keten van de verhittingstransformator met antiparallel geschakelde thyratrons voor het regelen van de stroom. Indien de warmteproduktie juist de goede waarde heeft, ontsteken de thyratrons op het ogenblik dat hun anodespanning maximaal is. Wordt de vloeistof te warm, dan valt het ontstekingstijdstip later en neemt de stroom af; wordt de vloeistof te koud, dan verschuift het ontstekingstijdstip de andere kant op en neemt de stroom toe.

afwezigheid van de impuls steeds gesloten zou houden. Daar de anodespanning van de buizen sinusvormig is en de ontsteekspanning lineair afhangt van de roosterspanning, kan men voor deze permanent aanwezige component van de roosterspanning eenvoudig een wisselspanning gebruiken die in tegenfaze is met de netspanning (*fig. 4*). De juist geschetste wijze van ontsteken maakt het mogelijk dat de buizen óók ontstoken kunnen worden in de tweede helft van het tijdinterval waarin de anodespanning positief is, zodat de stroom ook waarden kan hebben die kleiner zijn dan de helft van de maximale en zelfs kan afnemen tot nul [3]).

[3]) Een voorbeeld van een vroegere toepassing van ontsteking door middel van een impuls vindt men in Philips techn. T. **12**, 83-94, 1950.

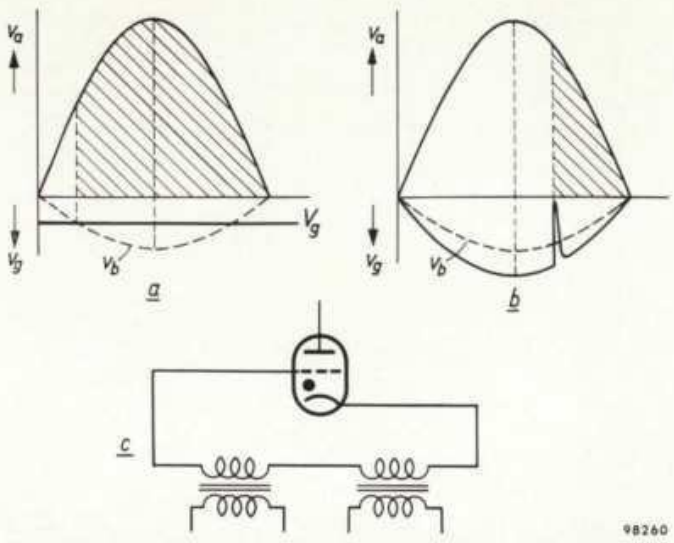


Fig. 4. *a*) Indien de anodespanning v_a van een thyratron sinusvormig varieert, doet de waarde v_b van de (negatieve) roosterspanning die juist voldoende is om ontsteken te voorkomen, dat ook. Heeft deze roosterspanning v_g een constante waarde V_g die kleiner is dan de maximale waarde van v_b, dan ontsteekt de buis op het ogenblik dat v_b sterker negatief wordt dan V_g en blijft gedurende de rest van de halve netperiode geleidend. Ontsteking in de tweede helft van dit tijdinterval is met een gefixeerde roosterspanning niet mogelijk. *b*) Ontsteking in de tweede helft van de halve netperiode is mogelijk indien v_g bestaat uit de superpositie van een sinusvormige spanning die groter dan v_b (en dus in tegenfaze met v_a) is, en een impuls. *c*) De permanent aanwezige component van v_g en de impuls worden aan de roosterkring toegevoerd via afzonderlijke transformatoren.

De schakeling die de impuls levert, en die we de ontsteekschakeling zullen noemen, vindt men afgebeeld in *fig. 5*. In de gehele opstelling bevinden zich twee van deze schakelingen, voor ieder der thyratrons (fig. 3) één. Het hart van de ontsteekschakelingen is opnieuw een thyratron (PL 2 D 21). De anodespanning v_a daarvoor wordt door middel van een transformator verkregen uit de netspanning en is dus eveneens een wisselspanning. De anode-

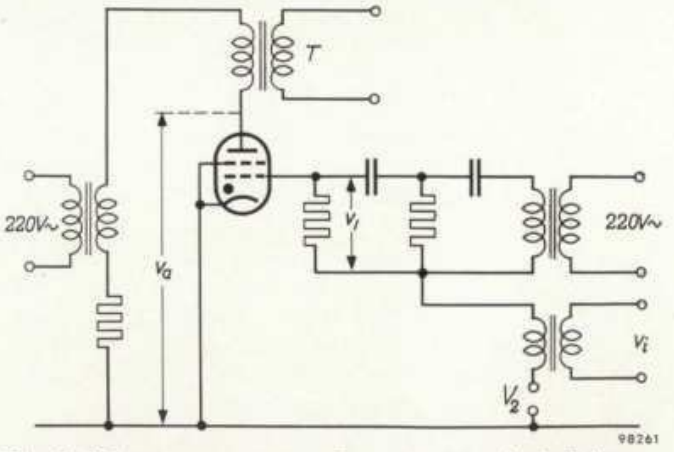


Fig. 5. Schema van een van de twee ontsteekschakelingen. v_i wisselspanning die in faze 90° achter is bij v_a; V_2 instelbare gelijkspanning. v_i wisselspanning waarvan de amplitude varieert met de temperatuur van de suspensie en die in faze of in tegenfaze met v_a is, al naar gelang deze temperatuur te hoog of te laag is. Door variatie van V_2 kan men ervoor zorgen dat de buis indien de amplitude van v_i nul is, juist ontsteekt als v_a maximaal is.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

stroom, die na het ontsteken van de buis gaat vloeien, loopt door de primaire van de uitgangstransformator T. Daar de uitgangsspanning van deze transformator evenredig is met de tijdsafgeleide van de anodestroom, geeft T dus een relatief grote spanningsimpuls op het ogenblik waarop de buis ontsteekt.

Het ogenblik waarop de thyratrons in de ontsteekschakelingen geleidend worden, moet uiteraard eveneens binnen de gehele halve netperiode kunnen verschuiven. Dat is bereikt door hun roosterspanning v_g een superpositie te doen zijn van:

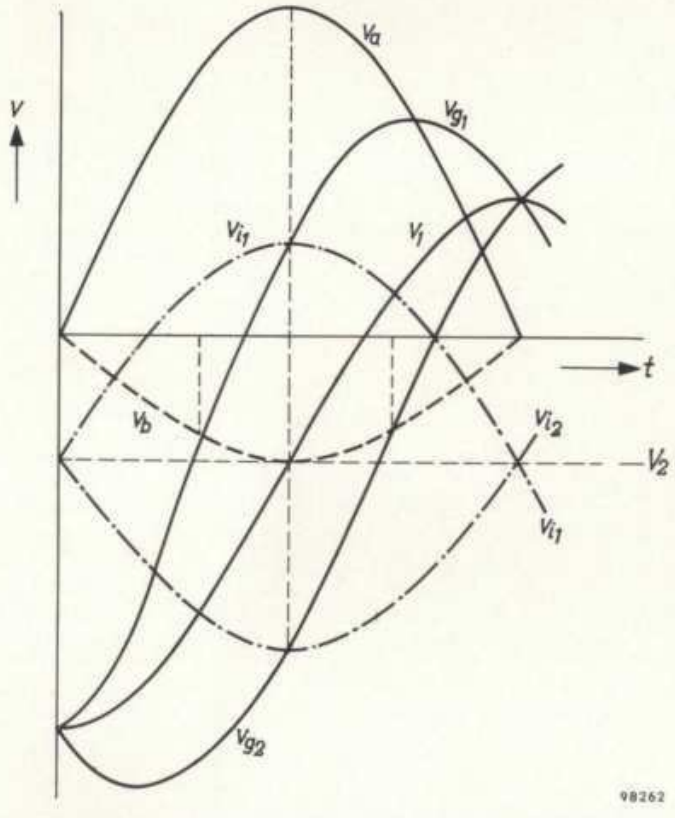


Fig. 6. De componenten van de roosterspanning van het thyratron in een der ontsteekschakelingen. De spanning v_i noemen we v_{i1} indien de suspensie te koud is en v_{i2} indien de suspensie te warm is. De lijnen die het tijdsverloop van de spanningen v_1, v_{i1} en v_{i2} weergeven, zijn getekend met als nullijn de lijn $v = V_2$. De lijnen v_{g1} en v_{g2} geven het tijdsverloop van de roosterspanning $V_2 + v_1 + v_i$ aan zoals dat is indien v_i de beide getekende vormen aanneemt. Deze vormen komen overeen met 0,02 °C te hoog en 0,02 °C te laag. Het snijpunt van de v_g-curve en de v_b-curve kan, aangezien v_i nog veel groter amplitudes kan krijgen dan hier geschetst, vrijwel binnen het gehele tijdinterval van een halve periode verschuiven.

a) een wisselspanning v_1 die 90° in faze achter is bij de anodespanning v_a,
b) een instelbare gelijkspanning V_2,
c) een wisselspanning v_i waarvan de amplitude V_i evenredig is met het verschil tussen de gemeten en de gewenste suspensietemperatuur; deze spanning is in faze of in tegenfaze met v_a naar gelang de suspensie te warm of te koud is. Deze spanning wordt geleverd door een elektrische thermometer.

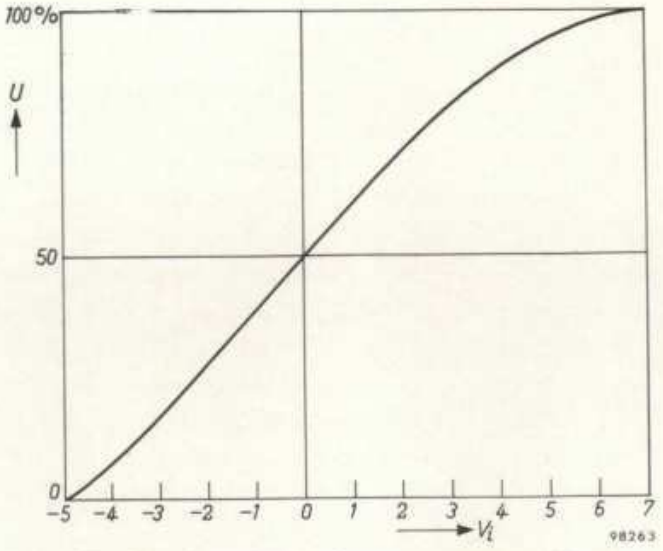


Fig. 7. Het door de verhitter afgegeven vermogen U varieert in een groot deel van het regelgebied lineair met de temperatuurafwijking van de suspensie, dat wil zeggen met V_i. De waarde van U is aangegeven als percentage van de maximale, de eenheden langs de horizontale as zijn willekeurig gekozen.

Fig. 6 toont hoe v_g met de tijd varieert en hoe variatie van V_i het ogenblik waarop de impuls optreedt, binnen vrijwel het gehele tijdinterval van een halve netperiode kan doen verschuiven. De gelijkspanning V_2 dient om het tijdstip van ontsteking indien $V_i = 0$ is — in de evenwichtstoestand dus — te kunnen doen samenvallen met het ogenblik waarop v_a maximaal is. Het in het verwarmingselement gedissipeerde vermogen heeft dan, evenals de gemiddelde stroom, juist de helft van de maximale waarde. Men kan aantonen dat het vermogen dat de verhitter aan de suspensie afgeeft, in een flink temperatuurgebied nagenoeg lineair afhangt van het weg te regelen temperatuurverschil (*fig. 7*).

De eerder genoemde elektrische thermometer is een weerstandsthermometer. Zoals gebruikelijk, is dit een brugschakeling van Wheatstone (*fig. 8*). Het op temperatuurveranderingen reage-

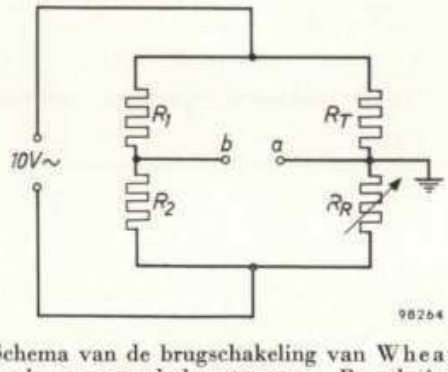


Fig. 8. Schema van de brugschakeling van Wheatstone die fungeert als weerstandsthermometer. R_T platinadraad die zich in de suspensie bevindt. R_R variabele vergelijkingsweerstand, R_1 en R_2 vaste weerstanden. De spanning tussen b en a wordt versterkt en bestuurt (als v_i) de ontsteekschakelingen. R_R kan veranderd worden in 20 stappen die overeenkomen met 4 °C, en 20 die overeenkomen met 0,2 °C.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

rende element daarin is een platinadraad R_T, waarvan de weerstand bij 20 °C ongeveer 100 Ω bedraagt. De brug wordt gevoed met een wisselspanning (met de netfrequentie) van 10 V. De vergelijkingsweerstand R_R kan gevarieerd worden in 20 stappen die elk overeenkomen met 4 °C, en verder in eveneens 20 stappen die elk overeenkomen met 0,2 °C. De spanning die tussen de punten *a* en *b* optreedt indien de temperatuur van de gewenste waarde afwijkt, is ongeveer 1 mV per 0,1 °C. Deze spanning is te klein om als v_i (fig. 5 en 6) te kunnen fungeren en wordt derhalve aanzienlijk versterkt alvorens ze aan de ontsteekschakelingen wordt toegevoerd. De versterking is zodanig dat een afwijking van 0,05 °C van de gewenste temperatuur het ogenblik waarop de ontsteekschakeling een impuls geeft, vrijwel geheel naar het begin of einde van de desbetreffende halve periode verschuift en dus de verhitter geheel in- of uitschakelt, al naar gelang de suspensie te koud of te warm is. De versterker is zodanig geconstrueerd dat ook gedurende de opwarmperiode die aan een experiment met de reactor voorafgaat en gedurende welke het verschil tussen de werkelijke en de gewenste temperatuur (en daarmee de spanning tussen *a* en *b*) zeer groot is, zijn uitgangssignaal symmetrisch is. De bijdrage die de beide thyratrons PL 260 (fig. 3) tot de primaire transformatorstroom leveren, is dus onder alle omstandigheden gelijk. Een asymmetrie (d.w.z. de aanwezigheid van een gelijkstroomcomponent) in deze stroom zou de transformator ernstig kunnen beschadigen.

Een blokschema van de gehele regelapparatuur vindt men in *fig. 9*.

Het instellen van de temperatuur

Het instellen van de temperatuur van de suspensie gaat aldus in zijn werk dat men allereerst de vergelijkingsweerstand in de weerstandsthermometer (fig. 8: R_R) op de waarde instelt die met de gewenste temperatuur T overeenkomt en dat men vervolgens de pomp en de regelapparatuur inschakelt. De koelwaterkraan wordt niet of slechts een weinig geopend. Daar de brugschakeling aanvankelijk ver van zijn evenwichtstoestand verwijderd is, geeft de verhitter zijn maximale vermogen af. De warmtetoevoer bedraagt dan ca. 12 kW (5 van de verhitter en 7 van de pomp), de afvoer ten hoogste 1 kW. De opwarmsnelheid is dan ca. 2 °C per minuut. De gewenste temperatuur wordt dus vrij snel bereikt. Zodra deze met 0,05 °C is overschreden, is de verhitter geheel uitgeschakeld (zie boven). Op het bedieningspaneel kan men dit constateren. Ook nu zal de warmteproduktie in het algemeen nog te groot zijn, maar de snelheid waarmee de temperatuur stijgt, is uiteraard aanzienlijk gereduceerd (tot minder dan 1 °C/min). Men heeft dientengevolge ruimschoots de tijd om de koelwaterkraan verder te openen, totdat er b.v. 6 kW wordt afgevoerd.

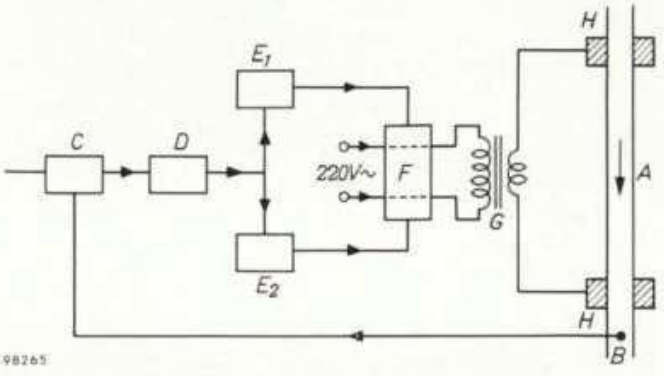


Fig. 9. Schematische voorstelling van de gehele regelapparatuur. *A* pijpstuk, *B* platinadraad. *C* brug van Wheatstone waarvan *B* deel uitmaakt. *D* versterker die de brugspanning versterkt tot een signaal dat de ontsteekschakelingen E_1 en E_2 kan besturen. *F* regelaar van primaire transformatorstroom (zie fig. 3). *G* verhittingstransformator. *H* aansluitingen van de secundaire van *G* op het pijpstuk.

De temperatuur daalt dan langzaam. Zodra ze minder dan 0,05 °C van T afwijkt, gaat de regeling werken en wordt de temperatuur ergens in het gebied van $(T + 0{,}05)$ tot $(T - 0{,}05)$ gestabiliseerd. De preciese waarde van de evenwichtstemperatuur wordt bepaald door de stand van de koelwaterkraan. Door deze nog wat meer of minder ver te openen, kan men nl. de regelaar in het midden van het regelgebied brengen. Men doet dit aan de hand van de stand van een meter die het afgegeven vermogen van de regelaar aanwijst. De regelaar kan daarna dus variaties van $2^1/_2$ kW in het koel- of pompvermogen opvangen in dien zin dat de daaruit resulterende variaties van de suspensietemperatuur gereduceerd worden tot minder dan 0,05 °C.

De eigenschappen van de regelinstallatie

We zullen thans achtereenvolgens nagaan in welke mate de installatie een storing reduceert en of ze stabiel is. Voor de beantwoording van beide vragen moeten we weten hoe groot de totale versterking $A(\omega)$ in de regelkring is. Hiermede wordt bedoeld de verhouding waarin een sinusvormig signaal met hoekfrequentie ω versterkt wordt wanneer het achtereenvolgens alle elementen van de regelkring passeert. Ten einde de functie $A(\omega)$ te bepalen, zal men de regelkring ergens moeten „openknippen". Indien alle elementen lineair zijn, doet het er niet toe waar men de kring openknipt. Verder moet men weten hoe de fazeverschuiving φ tussen het ingangs- en het uitgangssignaal van de opengesneden kring varieert met de frequentie van het ingangssignaal. Samenvattend kunnen we dus zeggen dat we de frequentie-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

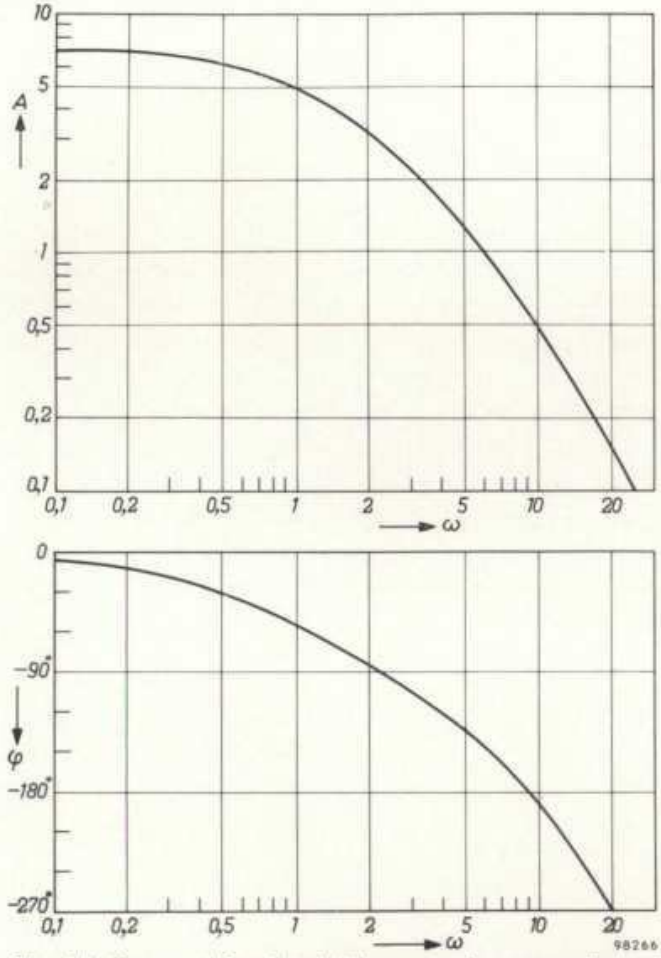


Fig. 10. Frequentiekarakteristieken van de „opengeknipte" regelkring. *a*) Amplitudekarakteristiek. *b*) Fazekarakteristiek. Bij zeer lage frequenties is de versterking ongeveer 7. Voor de waarde van de hoekfrequentie ω waarbij de fazeverschuiving $\varphi = 180°$ is, is de versterking kleiner dan 1.

karakteristieken (amplitude- en fazekarakteristiek) van de opengeknipte kring nodig hebben.

Fig. 10 toont deze frequentiekarakteristieken van de hier beschreven installatie. Het verband tussen de versterking A en de fazeverschuiving φ wordt in beeld gebracht in het zg. Nyquist-diagram (*fig. 11*).

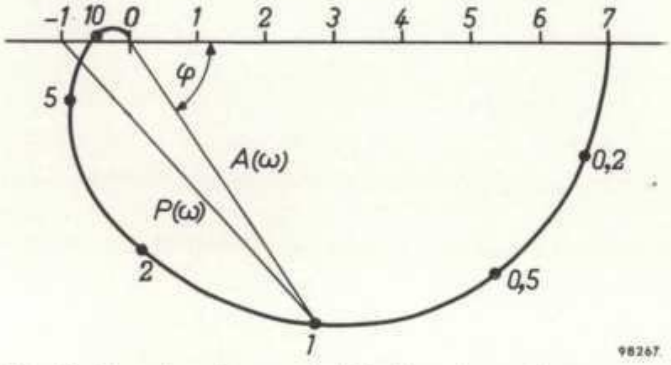


Fig. 11. Nyquist-diagram (polaire figuur) van de temperatuurregelinstallatie. De getallen bij de curve geven aan voor welke hoekfrequentie de desbetreffende punten ervan gelden. De afstand van deze punten tot de oorsprong is gelijk aan de bij die frequentie optredende versterking, φ is de fazedraaiing. De curve omvat niet het punt -1 van de as (vgl. fig. 10), waaruit geconcludeerd mag worden dat de installatie stabiel is. De verbindingslijn van een punt van de curve met het punt -1 geeft de waarde van de reductiefactor $P(\omega)$.

De lengte van de verbindingslijn van de oorsprong met zeker punt daarvan is gelijk aan de bij de desbetreffende frequentie optredende versterking, de hoek tussen deze lijn en de as is gelijk aan φ. De versterking wordt in deze figuur dus voorgesteld door een vector.

De factor P waarmee een regelinstallatie een binnenkomende periodieke storing van zekere frequentie reduceert, is gelijk aan de absolute waarde van de vectorsom van de juistgenoemde voor die frequentie geldende vector en de eenheidsvector in de asrichting. Men vindt de grootte ervan grafisch dus zeer gemakkelijk uit de lengte van de verbindingslijn van het desbetreffende punt van het Nyquist-diagram met het punt -1 op de as. Voor frequenties waarvoor $\varphi \approx 0$ is, gaat de genoemde vectorsom over in de aritmetische som [4]). Uit fig. 10*a* kan men afleiden dat voor dergelijke frequenties P hier gelijk is aan acht (zeven plus een). *Fig. 12* toont hoe de reductiefactor varieert met toenemende frequentie. Men ziet dat de waarde 8 ongeveer geldt

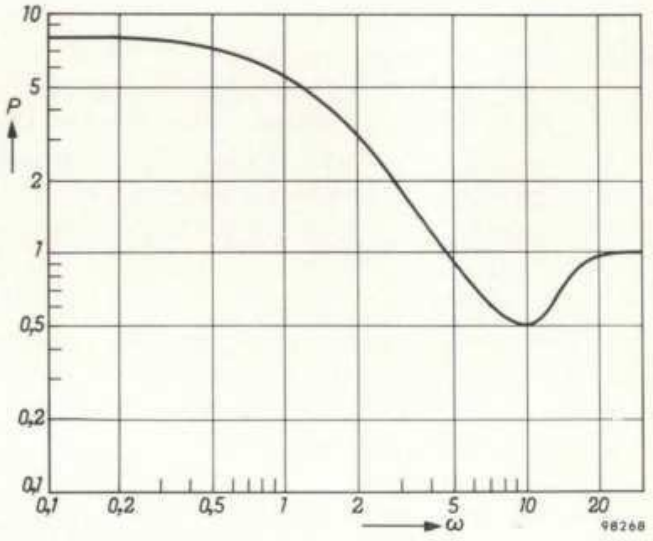


Fig. 12. De factor P waarmee storingen worden gereduceerd, als functie van de hoekfrequentie ω van de (sinusvormige onderstelde) storing.

voor storingen met een hoekfrequentie tussen 0 en $^1/_2$ (d.i. $^1/_{12}$ Hz). Bij $\omega = 1{,}5$ (d.i. $^1/_4$ Hz) is de reductiefactor gedaald tot de halve waarde. Daar de in de praktijk voorkomende storingen, zoals reeds werd vermeld, zeer langzaam zijn, is deze „bandbreedte" van de regelapparatuur alleszins voldoende.

Ten aanzien van de stabiliteit leren de figuren 10 en 11 dat bij de frequentie waarbij φ is toegenomen tot 180° — dat wil zeggen: waarbij de tegen-

[4]) Dikwijls drukt men de mate waarin storingen gereduceerd worden ook uit in de grootheid $1/P$ (Engels „deviation ratio").

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

koppeling in de regelkring in een meekoppeling is overgegaan —, de versterking kleiner dan één is; het Nyquist-diagram „omvat" het punt −1 niet. Hieruit mag men concluderen dat de regelinstallatie inderdaad stabiel is [5]).

Tevens ziet men dat een aanmerkelijke vergroting van de versterking, en daarmee van P, niet mogelijk is zonder de stabiliteit in gevaar te brengen. Een grotere reductiefactor heeft men trouwens niet nodig. Met een verandering van niet minder dan 1 kW in het koel- of pompvermogen correspondeert zonder regeling een temperatuurverandering van ca. $^1/_4$ °C, en dus mèt regeling een temperatuurverandering van slechts ca. $^1/_{30}$ °C.

Meting van de gemiddelde concentratie van de suspensie in het reactorvat

Daar men bij het onderzoek naar de eigenschappen van een suspensiereactor o.a. het verband tussen de concentratie van de suspensie en de, sterk hiermee variërende, reactiviteit te weten wil komen [1]), is het noodzakelijk de gemiddelde waarde die deze concentratie in het reactorvat heeft, zo nauwkeurig mogelijk te meten. Helaas is het niet mogelijk de gezochte concentratie rechtstreeks te berekenen uit de hoeveelheden vaste stof en vloeistof die zich in het gehele reactorcircuit bevinden. Daar een suspensie uitzakt, is in een leidinggedeelte waarin de vloeistof naar boven stroomt, de concentratie groter dan elders. Is de stroomsnelheid in een dergelijk leidinggedeelte zo klein dat ze gelijk wordt aan de snelheid waarmee de deeltjes (ten opzichte van de vloeistof) zakken, dan zal op den duur zelfs alle vaste stof zich in dat leidinggedeelte verzamelen. In het reactorvat, waar de stroomsnelheid ten gevolge van de relatief grote diameter klein is, is het opzameleffect duidelijk waarneembaar. Om de concentratie aldaar te weten te komen, behoeft men dus een meetmethode waarmee men uitsluitend de inhoud van het vat onderzoekt.

We zullen in dit hoofdstuk twee methodes bespreken die ontwikkeld werden. Slechts één van de twee methodes is universeel toepasbaar. De andere, die we aanstonds het eerst bespreken, kan alleen gebruikt worden bij één van de beide typen reactorvaten die voor een suspensiereactor in aanmerking komen. De vorm van deze twee typen wordt bepaald door het gedrag van de suspensie; in vaten van ongeschikte vorm zakt de suspensie plaatselijk uit op de wand en/of zijn er van plaats tot plaats grote concentratieverschillen. Uit experimenten is gebleken dat de verdeling van de gesuspendeerde deeltjes over het volume het meest gelijkmatig is en dat plaatselijk uitzakken van deze deeltjes op de wanden niet optreedt indien het reactorvat ongeveer de vorm heeft die in *fig. 13a* is geschetst, en die we gemakshalve de cilindrische zullen noemen. De vloeistof stroomt hier van beneden naar boven en krijgt door de schoepen *1* een roterende beweging;

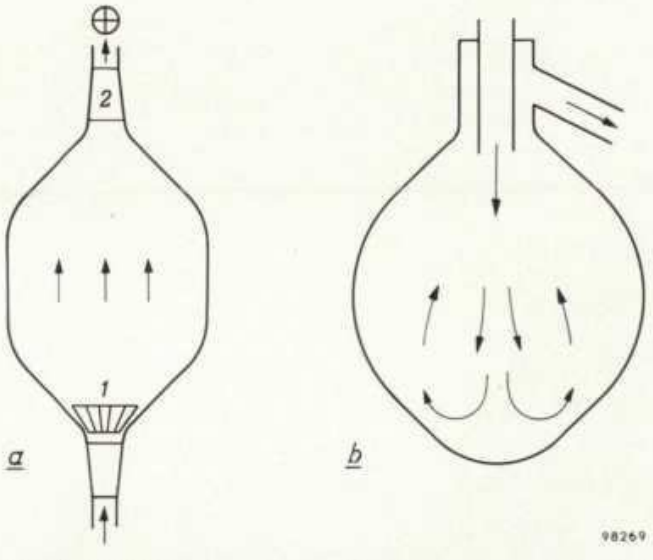


Fig. 13. *a*) Cilindrisch reactorvat. De schoepen *1* geven de vloeistof een roterende beweging, die door het kruisstuk *2* weer teniet wordt gedaan. *b*) Bolvormig reactorvat. De pijlen geven aan in welke richting de suspensie stroomt.

het kruisstuk *2* doet die beweging weer te niet. De tweede vorm die bruikbaar is, vindt men afgebeeld in fig. 13*b*. Deze vorm, die we de bolvormige noemen, heeft constructief voordelen. Verder behoeft men, door de sterke turbulentie die de vloeistof hier vertoont, geen speciale maatregelen te nemen, om uitzakken op de wand te voorkomen. Wel is de verdeling van de gesuspendeerde deeltjes over het volume minder gelijkmatig dan bij het cilindrische vat.

Een onderzoek omtrent deze gelijkmatigheid werd verricht door plaatselijk de concentratie te meten met behulp van de absorptie van licht. Het principe van de meetmethode vindt men schematisch afgebeeld in *fig. 14a*. Daar UO_2-deeltjes, zelfs indien de concentratie gering en de spleet nauw is, nagenoeg alle licht absorberen, zijn de metingen verricht aan een suspensie van zandkorrels van geschikte grootte. Fig. 14*b* toont het resultaat van twee reeksen van metingen op verschillende hoogten in een cilindrisch vat.

[5]) Voor gecompliceerde regelinstallaties is de hier gegeven formulering van het stabiliteitscriterium te simplistisch. Voor betrekkelijk eenvoudige installaties als de onderhavige is ze voldoende. Een uitvoerige behandeling van het stabiliteitsprobleem vindt men o.a. in G. S. Brown en D. P. Campbell, Principles of servomechanisms, Wiley & Sons, New York 1948, of in G. J. Thaler en R. G. Brown, Servomechanism analysis, McGraw-Hill, New York 1953. *Opmerking van de redactie:* Een afleiding van de formules waaruit de figuren 10, 11 en 12 zijn verkregen, zal gegeven worden in een binnenkort in dit tijdschrift verschijnend artikel dat gewijd zal zijn aan het toepassen van de regeltheorie op praktijkproblemen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

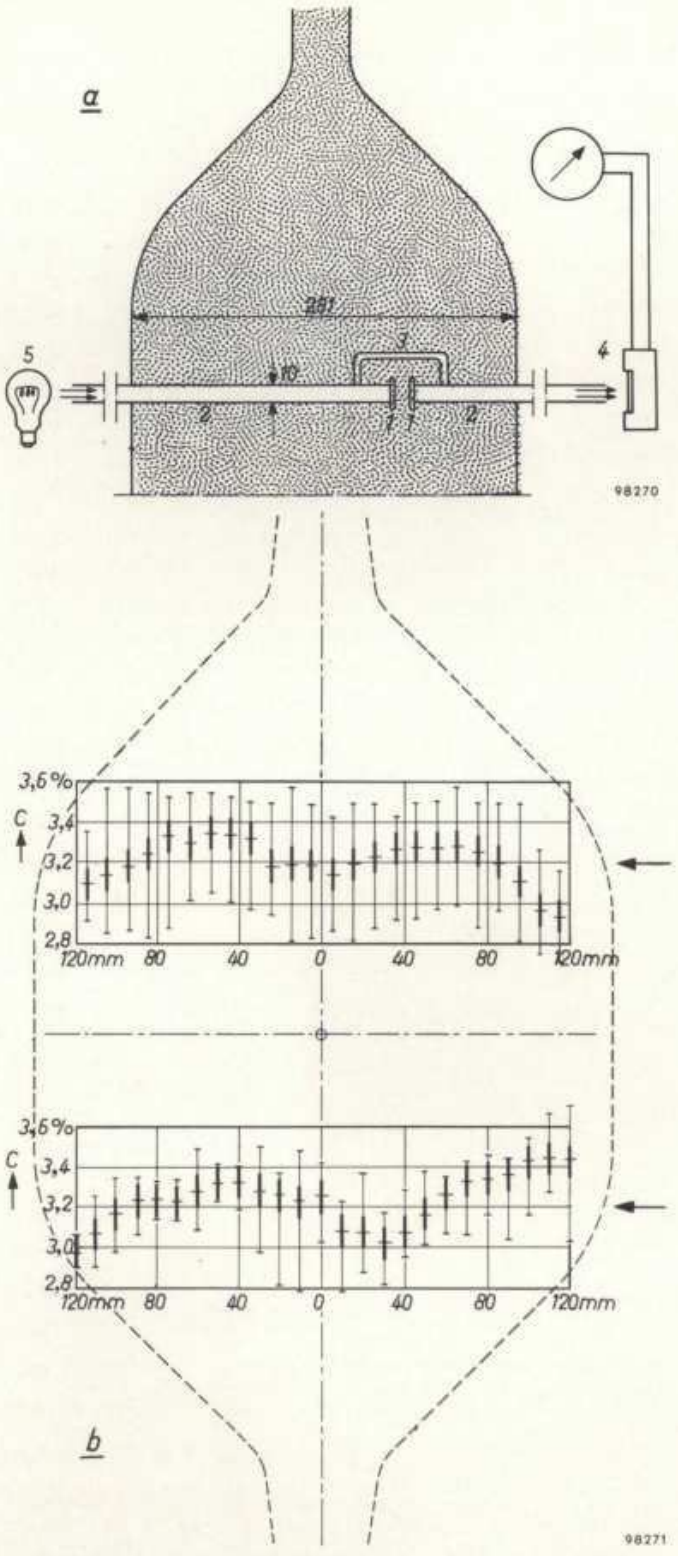


Fig. 14. *a*) De plaatselijke concentratie in het reactorvat is op enige hoogten gemeten door middel van de absorptie van licht. De vensters *1* die op de buizen *2* zijn aangebracht, worden door beugels *3* op een constante afstand gehouden. Het geheel is in de lengterichting verschuifbaar. De fotocel *4*, die verbonden is met een galvanometer, meet in welke mate het licht van de gloeilamp *5* geabsorbeerd wordt. *b*) De concentratie in vol.-% vaste stof op verschillende plaatsen in het cilindrische reactorvat (stippellijn). De pijlen (rechts) geven aan op welke hoogten er gemeten werd. De lengte van de dikke verticale streepjes geeft de onzekerheid in de meting, het horizontale streepje de meest voorkomende waarde van de concentratie. De uiteinden der dunne verticale streepjes geven de grootste waarde van de snelste fluctuaties in de concentratie die de galvanometer kon volgen (aanwijstijd ongeveer 0,5 s). Het is dus mogelijk dat er fluctuaties van nog kortere duur voorkwamen met nog grotere amplitude. Deze zijn echter kernfysisch vermoedelijk niet belangrijk.

De directe methode

Beide methodes voor het meten van de gemiddelde concentratie in het reactorvat berusten op de wet dat het verschil in hydrostatische druk van twee zich op ongelijke hoogte bevindende punten evenredig is met de dichtheid van de vloeistof. De eenvoudigste methode vindt men schematisch voorgesteld in *fig. 15*. Onder en boven het reactorvat zijn aftakkingen gemaakt, die verbonden zijn met een verschilmanometer. Daar zich in de manometerleidingen geen suspensiedeeltjes bevinden — de vloeistof is in rust en de enkele deeltjes die er toch in doordringen, zullen vrij snel uitzakken — vindt men het drukverschil uit het produkt van het hoogteverschil δh van de vloeistofniveaus in beide

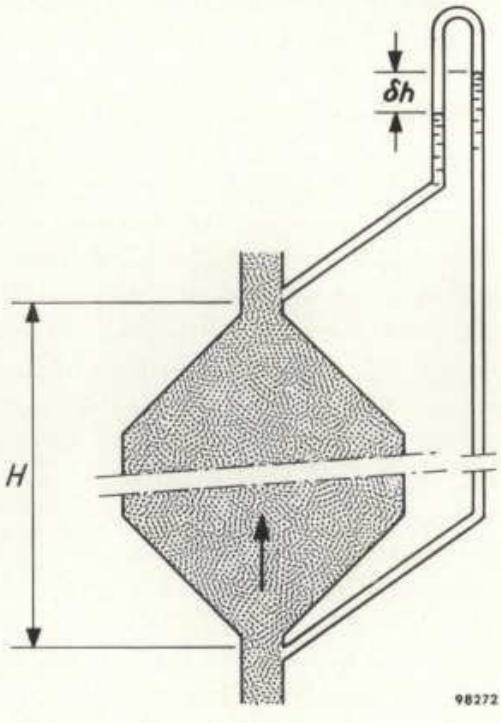


Fig. 15. Principe van de methode van meting van de gemiddelde concentratie van de suspensie in het vat uit het hydrostatisch drukverschil. De manometerleidingen bevatten vloeistof waarin zich géén UO_2-deeltjes bevinden.

benen en de dichtheid ϱ_l van de vloeistof. Veronderstellen we even dat het stromen van de suspensie géén bijdrage tot dit drukverschil levert, dan moet anderzijds het drukverschil gelijk zijn aan $H \times C(\varrho_s - \varrho_l)/100$. Hier is H de verticale afstand van de manometeraansluitingen (fig. 15), C de concentratie van de suspensie in vol.-% en ϱ_s de dichtheid van de vaste deeltjes die in de vloeistof gesuspendeerd zijn. Gelijkstellen van beide uitdrukkingen voor het drukverschil levert een vergelijking waaruit men C kan berekenen.

Daar δh, indien C de grootste voorkomende waarde heeft, slechts ongeveer 10 cm is, en dientengevol-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

ge bij gebruik van de in fig. 15 geschetste vloeistofmanometer de niet zeer grote afleesnauwkeurigheid de relatieve onzekerheid in het meetresultaat zou bepalen, wordt in werkelijkheid het drukverschil gemeten met een speciaal voor dit doel geconstrueerde elektrische drukverschilopnemer met membraan. Dank zij de gevoeligheid en de zeer grote stabiliteit van dit instrument (zowel ten aanzien van het nulpunt als van de ijking) is een nauwkeurige meting van het drukverschil mogelijk [6]).

Uiteraard zal in het algemeen het stromen van de suspensie in werkelijkheid wèl een zekere bijdrage leveren tot het gemeten drukverschil. Deze bijdrage is bij een turbulente stroming ongeveer evenredig met ϱv^2; hierin is ϱ de dichtheid van de suspensie en v de stroomsnelheid van de vloeistof. Dank zij de geldigheid van deze relatie was het mogelijk dit storende verschijnsel goeddeels te compenseren. Indien een vloeistof door een buis stroomt waarin zich een insnoering bevindt, is immers de druk op de buiswand ter plaatse van de insnoering lager dan elders, en wel met een bedrag dat eveneens evenredig is met ϱv^2. Door dus de bovenste manometeraansluiting niet aan te brengen op de uitstroompijp, maar op een geschikt punt van het reactorvat — met grotere diameter dus —, was het mogelijk het ene effect door het andere nagenoeg te doen opheffen en aldus de correctie die op de aanwijzing van de manometer moet worden aangebracht, sterk te reduceren. De grootte van de nog overblijvende correctie werd bepaald door ook in het reactorcircuit de zuivere vloeistof te laten stromen en te meten welk drukverschil er dan bij diverse stroomsnelheden optreedt. *Fig. 16* toont een maatschets van het cilindrische reactorvat dat bij de subkritische experimenten gebruikt wordt; in deze schets zijn de plaats en de uitvoering der manometeraansluitingen aangegeven.

Qua bruikbaarheid valt van de juistbeschreven meetmethode op te merken dat 1) de vereiste apparatuur eenvoudig is, 2) aan of in het reactorvat nauwelijks enig materiaal wordt aangebracht (dit zou extraverlies aan neutronen betekenen), 3) onderdelen van de apparatuur die binnen afzienbare tijd reparatie zouden kunnen behoeven, zich niet dicht bij het reactorvat bevinden (het radioactief worden van dergelijke onderdelen zou reparatie onmogelijk of althans zeer moeilijk maken). Tegenover deze voordelen staat echter dat de manometer een zekere onrust vertoont ten gevolge van wervelingen in de vloeistof. Het laatstgenoemde punt is er oorzaak van dat met deze methode alleen gemeten kan worden aan een cilindrisch reactorvat en niet aan een bolvormig. De stroming in het laatste is dermate „wild" dat de onrust van de manometer een enigszins nauwkeurige aflezing geheel onmogelijk maakt. Bij metingen aan een cilindrisch vat is de onzekerheid ongeveer 0,04 vol.-% UO_2. Daar de UO_2-concentratie onder normale omstandigheden ongeveer 2 vol.-% bedraagt, komt dit dus overeen met een relatieve onzekerheid van 2%.

De methode met de „reactorsimulator"

De tweede methode, die een variant is van de eerste, onderscheidt zich van deze vooral hierin, dat de onrust van de manometer zeer klein is, en dat de bijdrage in het drukverschil die een gevolg is van het stromen van de vloeistof, hier nagenoeg tot nul gereduceerd is. Deze methode is dus geschikt voor metingen aan een bolvormig reactorvat.

De juistgenoemde gunstige eigenschappen zijn te

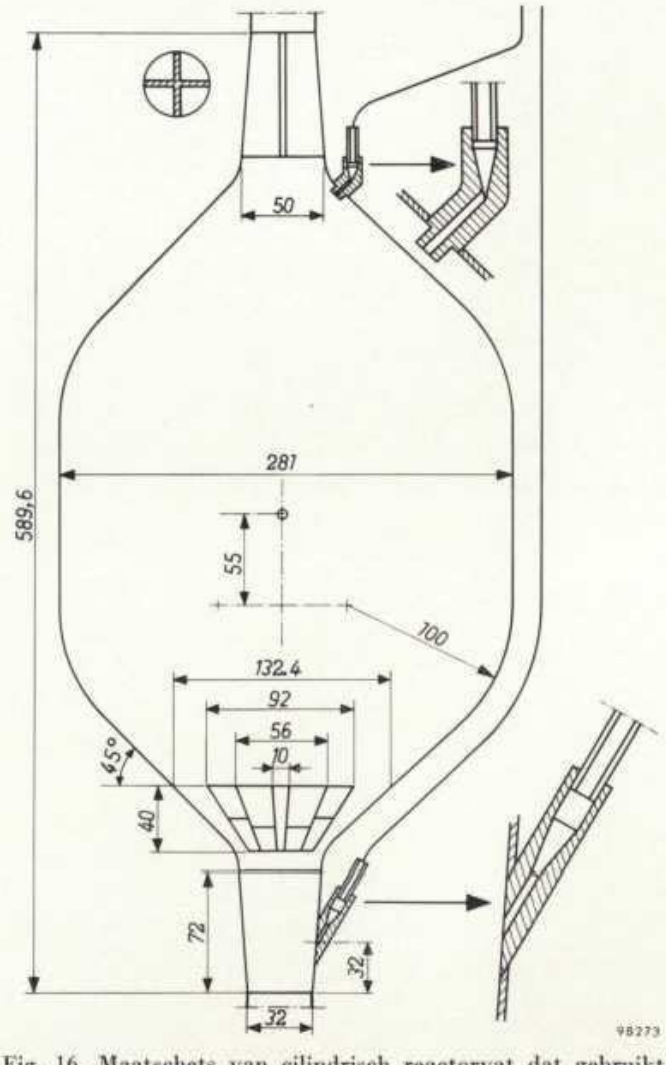


Fig. 16. Maatschets van cilindrisch reactorvat dat gebruikt wordt bij de subkritische experimenten, met aanboringen voor de verschilmanometer, waarmee de concentratie van de suspensie gemeten wordt.

[6]) Het instrument werd ontwikkeld onder leiding van J. A. H. Kersten (R.C.N.-KEMA-werkgroep). Het principe ervan is gelijk aan dat van normale in de handel zijnde drukverschilopnemers.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

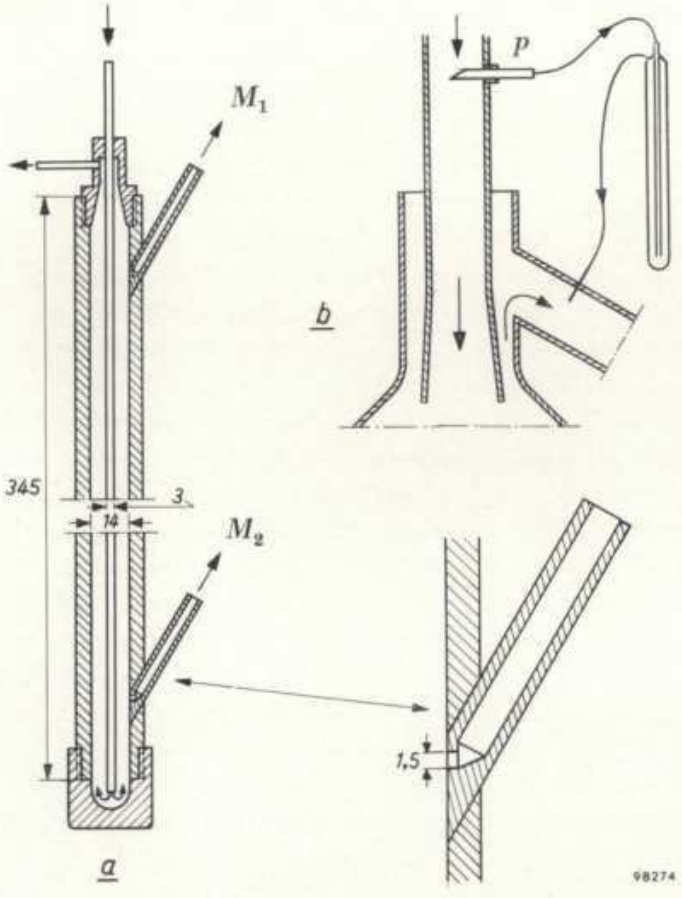


Fig. 17. *a*) Reactorsimulator. Het geheel is zo gedimensioneerd dat de snelheid waarmee de vloeistof in de wijde buitenbuis opstijgt, ongeveer gelijk is aan die in het cilindrische reactorvat. Bij M_1, M_2 wordt de verschilmanometer aangesloten.
b) Simulatorleiding en simulator aangesloten op reactorcircuit. Bij de geschetste stand van het pijpje *p*, waarmee de (toevoer-)simulatorleiding op het hoofdcircuit is aangesloten, is de aanwijzing van het meetinstrument evenredig met de gemiddelde concentratie in het reactorvat en (binnen een zeker gebied) onafhankelijk van de stroomsnelheid. Bij andere standen is dit niet het geval ten gevolge van uitslingeren der UO_2-deeltjes bij de mond van het pijpje.

danken aan het feit dat de manometer hier niet is aangesloten op het reactorvat of -circuit zèlf, maar op een apparaatje — dat we „reactorsimulator" genoemd hebben — dat deel uitmaakt van een leiding die parallel met het reactorvat is geschakeld. *Fig. 17a* toont de vorm van de simulator en fig. 17*b* laat zien op welke wijze het apparaatje in het geheel is opgenomen. De simulatorleiding is voor en achter het reactorvat op het reactorcircuit aangesloten. De vloeistof treedt de simulator binnen door de nauwe binnenbuis en stijgt daarna op in de buitenbuis, waarop de manometerleidingen zijn aangebracht. In deze buitenbuis stroomt de vloeistof zeer langzaam; het drukverschil ten gevolge van de stroming is dus zeer klein. Bovendien is de stroming zeer rustig; dit beperkt de onrust van de manometer. In de wijde simulatorbuis stroomt de vloeistof met dezelfde snelheid omhoog als in het reactorvat. Aldus is de invloed van de stroomsnelheid op de concentratie in reactorvat en simulator dezelfde en bestaat er evenredigheid tussen de aan de simulator gemeten concentratie en die van de suspensie in het reactorvat.

Een bijkomstig voordeel van het meten met de simulator is nog dat men de verticale afstand tussen de manometeraansluitingen — d.w.z. de gevoeligheid van de concentratiemeter — desgewenst groter kan maken dan bij de eerste methode. Men kan deze kunstgreep echter alleen toepassen indien de te meten concentratie niet snel met de tijd varieert. Door het vergroten van de simulator nl. zal de tijd die de suspensie nodig heeft om door de simulatorleiding te stromen, langer zijn dan de tijd die de vloeistof die door het reactorvat gaat, nodig heeft om van het eerste naar het tweede aansluitpunt te stromen (ca. 10 s). Dit betekent dat de simulator het tijdsverloop van een snelle concentratieverandering in het reactorvat niet getrouw afbeeldt.

Fig. 18 toont een resultaat van onderzoek naar het gedrag van een meetapparatuur met simulator. Men ziet dat de aanwijzing voortreffelijk evenredig is met de concentratie en (althans binnen het onderzochte snelheidsgebied) onafhankelijk van de stroomsnelheid van de suspensie. Wel blijkt de aanwijzing een constante factor te groot te zijn. Voor het doen van absolute metingen moet men dus deze factor door ijking bepalen. Relatieve concentratieveranderingen kunnen ook zonder ijking met een goede nauwkeurigheid gemeten worden.

Bij de thans in gang zijnde reactorexperimenten heeft het vat de cilindrische vorm. De concentratie kan gemeten worden volgens beide beschreven

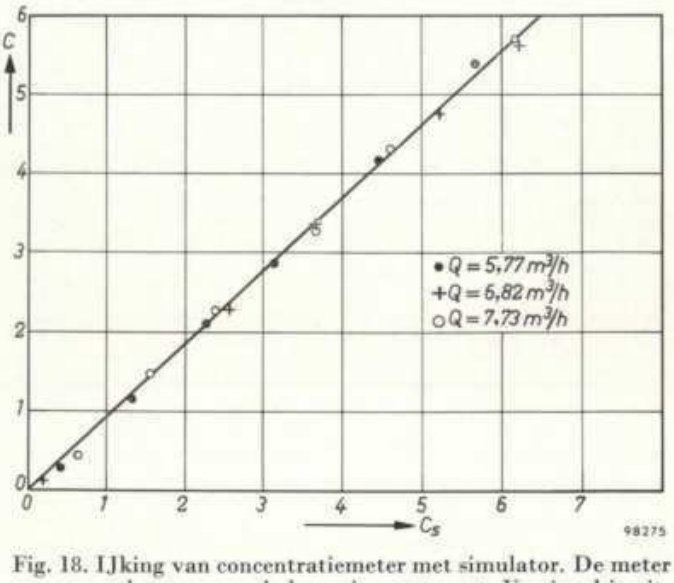


Fig. 18. IJking van concentratiemeter met simulator. De meter was aangesloten op een bolvormig reactorvat. Verticaal is uitgezet de ware concentratie (*C*) die bepaald werd door de inhoud van het reactorvat te wegen, horizontaal de uit de meteraanwijzing berekende (C_S). De eenheden langs beide assen zijn volumeprocenten. In het onderzochte snelheidsgebied is de aanwijzing onafhankelijk van de stroomsnelheid *Q*.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

methodes. Hoewel bij deze vorm van het reactorvat het gebruik van de eerstbesproken meetmethode zeer wel mogelijk is, is toch ook hier de methode met de simulator de nauwkeurigste gebleken. Bij toekomstig onderzoek aan een bolvormig reactorvat zal, zoals reeds werd opgemerkt, alleen de tweede methode gebruikt kunnen worden.

In het beginstadium van de onderzoekingen is nog een derde methode gebruikt [7]). Hierbij werd dicht bij de naar het vat voerende pijp van het reactorcircuit een radioactief preparaat opgesteld dat γ-straling uitzond, en aan de andere zijde van de pijp een stralingsdetector. De concentratie van de passerende suspensie werd bepaald uit de mate waarin de γ-straling geabsorbeerd werd. Een gunstige eigenschap van deze methode is dat men gemakkelijk een absolute ijking kan uitvoeren. Nadelen zijn 1) dat men niet aan het vat zèlf meet, 2) dat men door de beperkte sterkte van het preparaat een zekere tijd moet meten alvorens de statistische onnauwkeurigheid van het meetresultaat voldoende klein is (kort durende concentratieveranderingen kunnen dus niet of slechts zeer onnauwkeurig worden waargenomen) en 3) dat de methode moeilijk bruikbaar is indien de suspensie zelf een aanmerkelijke radioactiviteit vertoont. Ten gevolge van de laatstgenoemde eigenschap kan de methode bij de thans in gang zijnde reactorexperimenten reeds niet meer gebruikt worden. Voorheen heeft ze echter uitstekende diensten bewezen bij het controleren van de twee bovenbeschreven manometrische methodes.

Meting van de stroomsnelheid in het reactorcircuit

Voor het meten van de hoeveelheid vloeistof die per tijdseenheid door een leiding stroomt, maakt men in de techniek veelvuldig gebruik van twee methodes. Bij de eerste werkt men met een zg. meetflens, bij de tweede met een venturibuis. Het principe van beide methodes vindt men verklaard in *fig. 19*. Gezien de eisen en omstandigheden waarmede in het onderhavige geval rekening gehouden moest worden, is de keus gevallen op de laatstgenoemde methode. Een tekening van de venturibuis die werd ontworpen en die in constructie enigszins van de gangbare afwijkt, vindt men weergegeven in *fig. 20*. Men ziet dat de diameter ter plaatse van de vernauwing niet veel kleiner is dan elders, zodat de buis in het circuit geen belangrijke stromingsweerstand introduceert. Verder zal de slijtage ten gevolge van afslijpen door de suspensiedeeltjes niet groot zijn, zodat de ijking van de meter lange tijd betrouwbaar blijft. Ten aanzien van deze beide punten zou een meetflens minder geschikt zijn. De lengte van de buis is klein; dit is in verband met de beschikbare ruimte ook noodzakelijk. De aanboringen voor de leidingen die naar de drukmeter voeren, zijn zodanig geplaatst dat ze niet verstopt kunnen raken door suspensiedeeltjes.

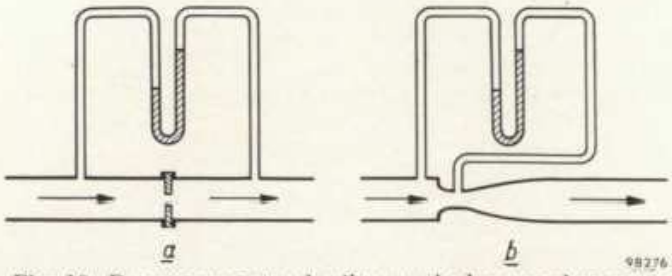


Fig. 19. De twee meest gebruikte methodes voor het meten van een stroomsnelheid. *a*) De snelheid wordt bepaald uit het drukverschil over een als stromingsweerstand fungerende meetflens. *b*) De snelheid wordt bepaald uit de verlaging van de druk op de buiswand die optreedt ter plaatse van een insnoering (venturibuis).

[7]) Deze methode werd ontwikkeld door J. Kalshoven (R.C.N.-KEMA-werkgroep).

Bij het ontwerp van de buis is ernaar gestreefd dat bij volle pompcapaciteit, dat wil zeggen bij een debiet van 10,5 m³ per uur, het drukverschil ongeveer 50 cm water zou zijn. Dit is inderdaad het geval. De ijking is uitgevoerd met schoon water en wel door vergelijking met een meetflens. De voor een suspensie geldende ijking wordt verkregen uit die voor water door de met een bepaald debiet overeenkomende uitslag te vermenigvuldigen met de dichtheid van de suspensie [8]). De meting van het drukverschil vindt plaats met een Philips drukverschilopnemer PR 6000 F; het wordt geregistreerd met behulp van een registreerapparaat PR 2200.

Overzicht van de gehele reactoropstelling

We geven thans tot slot een overzicht van de gehele reactoropstelling inclusief de meetapparatuur voor werkparameters die tot nu toe niet ter sprake kwamen. Schematisch vindt men het geheel voorgesteld in *fig. 21*. De leidingen en andere ruimten die de suspensie bevatten, zijn daarin aangegeven met rood. De zwart omrande lijnen stellen de leidingen van het reactorcircuit voor, de andere zijn hulpleidingen die dit circuit verbinden met apparaten voor het uit de vloeistof verwijderen en het doseren van de UO_2-korreltjes. Het primaire koelcircuit, waarin zich gedestilleerd water bevindt, is blauw, het secundaire, waardoor leidingwater stroomt, is groen. De andere blauwe leiding bevat gedestilleerd en tevens CO_2-vrij water („spoelwater") en voert naar de lagers van de pomp. Daar dit water enigszins onder druk staat, dringt het langzaam naar binnen en wordt er voorkomen dat (radioactieve) suspensiedeeltjes in de pakkingbus doordringen of eventueel naar buiten lekken. De gele leidingen bevatten samengeperste lucht (2 atm), die o.m. gebruikt wordt voor het leegpersen van het manoevreervat (zie figuur) en voor de gasbellenpomp, die het water in het primaire koelcircuit in beweging

[8]) Het drukverschil is immers evenredig met ϱv^2, vgl. blz. 106. Volkomen van toepassing is deze formule hier eigenlijk niet, daar de viscositeit van de suspensie niet geheel gelijk is aan die van zuiver water. Daar grote nauwkeurigheid hier niet vereist is, kan dit echter buiten beschouwing gelaten worden.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info

houdt [9]). Niet getekend is een leiding met samengeperste lucht (4 atm) voor het op afstand bedienen van kleppen.

De stroomsnelheid in het reactorvat kan worden gevarieerd met behulp van de driewegkraan *A* die zich in het reactorcircuit bevindt. Door deze kraan te verstellen, verandert men de verhouding van de stroomsterkten in het reactorvat en de (onder de kraan getekende) verticale kortsluitleiding *AB*. De geringe hoeveelheid water die via de pakkingbus van de pompas in het circuit geperst wordt, kan ontwijken via de stijgpijp. De stroomsnelheid in deze pijp is zo gering dat de UO_2-deeltjes er onderin blijven. Voor de verdere details verwijzen we naar het onderschrift van de figuur.

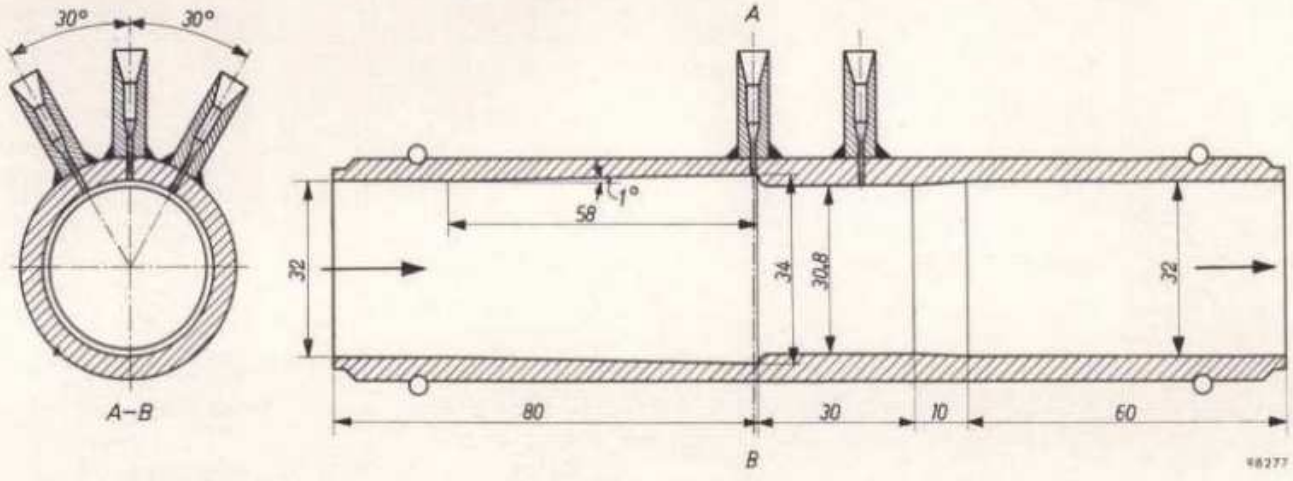


Fig. 20. Maatschets van de voor ons doel ontworpen venturibuis. De buis is kort en heeft een geringe weerstand. De uitmondingen van de manometerleidingen, die gewoonlijk rondom de buis worden verdeeld om een middelend effect te krijgen, mogen hier niet meer dan 30° van de verticaal afwijken opdat UO_2-deeltjes niet te ver in deze leidingen doordringen.

De belangrijkste werkparameters worden geregistreerd. Dit zijn:

1) de temperatuur van de suspensie in het reactorvat,
2) de stroomsnelheid van de vloeistof in het reactorcircuit,
3) de gemiddelde concentratie van de suspensie in het reactorvat,
4) de temperatuur die het water in het primaire koelcircuit heeft bij het verlaten van de primaire koeler.

De registraties geschieden met behulp van registreerapparaten van het type PR 2200, die in de bedieningsruimte zijn opgesteld. *Fig. 22* toont een registrogram van het tijdsverloop van de onder 3) genoemde concentratie.

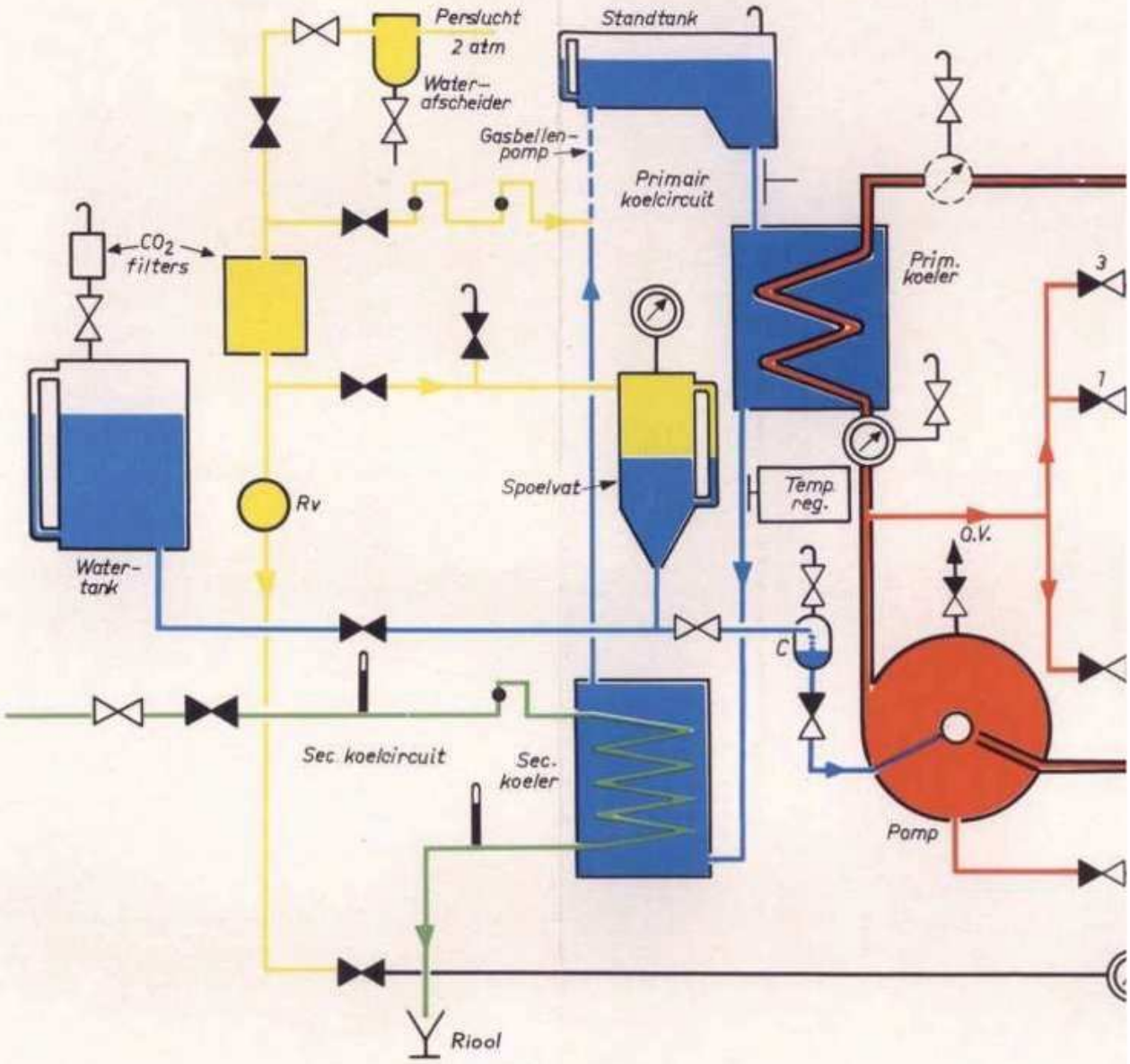
De waarde van de meeste verder van belang zijnde grootheden kan in de bedieningsruimte op meters worden afgelezen. Dit zijn:

1) de druk in het reactorcircuit voor en achter de pomp,
2) de temperatuur waarmee het water van het secundaire koelcircuit de secundaire koeler binnengaat en verlaat,
3) de secundaire koelwaterstroom,
4) de luchtstroom naar de gasbellenpomp,
5) de drukken in de leidingen voor samengeperste lucht (4 resp. 2 atm).

In de bedieningsruimte bevindt zich een groot paneel waarop het schema van fig. 21 is geschilderd. De juistgenoemde meters plus een aantal kranen bevinden zich op dit paneel, en wel op de plaats die ze in het schema behoren te hebben (*fig. 23*). Een aantal van deze meters is gedupliceerd; het parallelexemplaar bevindt zich in de ruimte waarin de reactor is opgesteld. Uit fig. 21 kan men aflezen met welke meters dit het geval is. De meters voor de minder belangrijke grootheden, en ook die voor grootheden welke slechts af en toe behoeven te worden gemeten, bevinden zich niet op het bedieningspaneel maar in de reactorruimte. Hiertoe behoren o.a. (vgl. fig. 21) meters voor de p_H en het elektrisch geleidingsvermogen van de vloeistof waarin het UO_2 is gesuspendeerd, een thermometer in het secundaire koelcircuit bij de ingang van de primaire koeler, peilglazen, manometers enz.

Dank zij de aanwezigheid van de in dit artikel beschreven meetapparatuur is een uitvoerige bestudering van de eigenschappen van de subkritische reactoropstelling en een controle op de diverse

[9]) De werking van een dergelijke pomp werd onlangs in dit tijdschrift in ander verband besproken (Philips techn. T. **20**, 203, 1958, no. 6/7).



Verklaring:

Zwart omrande leidingen behoren tot het reactorcircuit; de andere zijn hulpleidingen.

Rood : suspensie
Blauw: gedestilleerd water
Groen : leidingwater
Geel : samengeperste lucht

Afsluiter, niet op bedieningsbord

Afsluiter, op afstand bediend

Afsluiter, op het bedieningsbord

Elektrische thermometer

Kwikthermometer

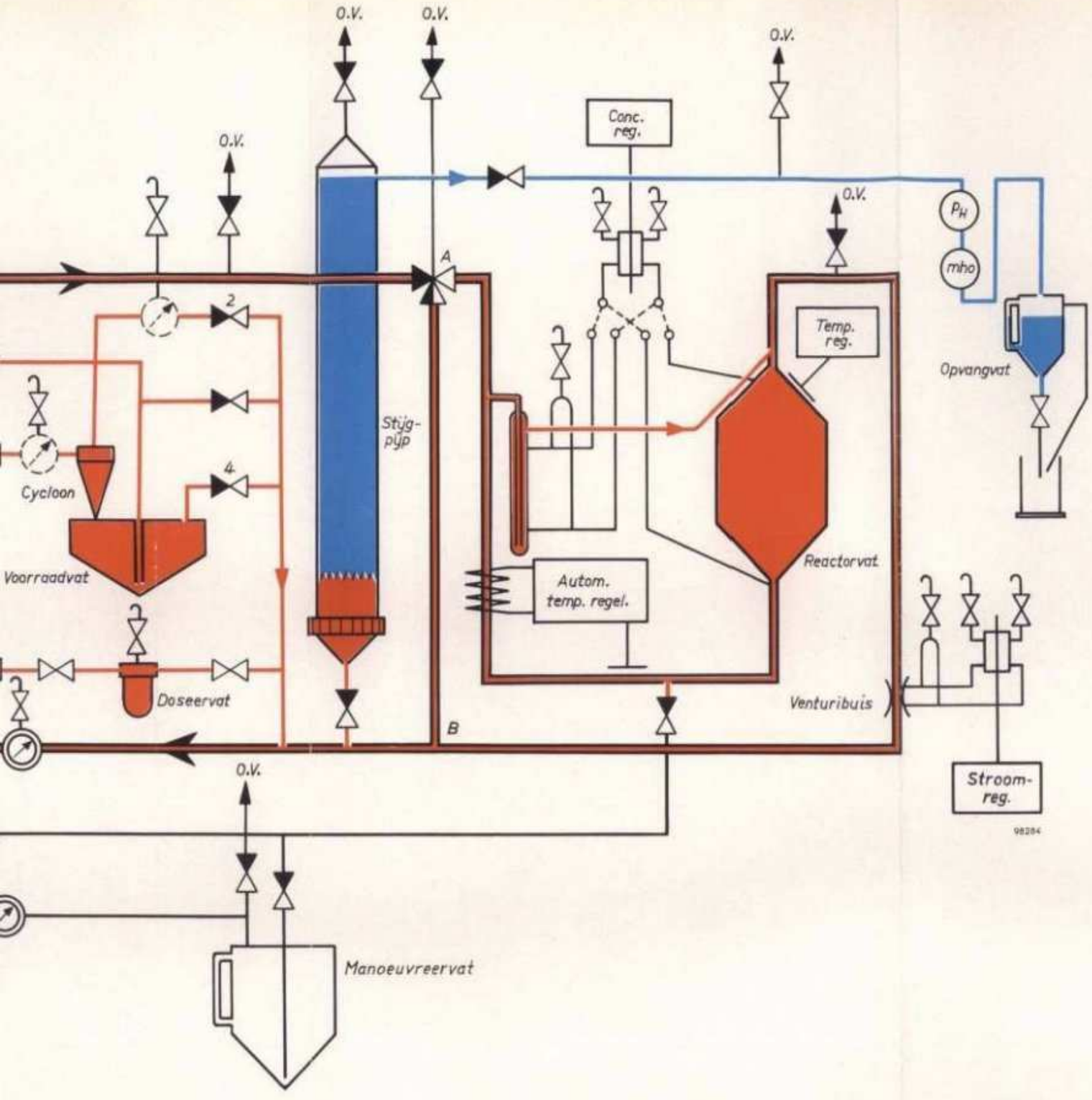
Manometer, bij reactor en op bedieningsbord

Manometer, alleen op bedieningsbord

Manometer, alleen bij de reactor

Stroommeter met kogel

Digitized in Heiloo the Netherlands



Elektrische drukverschilopnemer

Ontluchting

O.V. Ontluchting via ontluchtvat, waarin van buitenaf geen CO_2 kan doordringen

Peilglas

Fig. 21. Schema van de subkritische suspensiereactoropstelling die zich in een der laboratoria van de N.V. KEMA te Arnhem bevindt. Door het reactorcircuit (zie Verklaring) stroomt permanent een suspensie van UO_2-deeltjes in koolzuurvrij gedestilleerd water. De snelheid van de pomp is niet regelbaar; de stroomsnelheid in het reactorvat wordt gevarieerd met behulp van de driewegkraan *A* die een grotere of kleinere fractie van de stroom door de kortsluitleiding *AB* doet vloeien. De stroom door het reactorvat wordt gemeten met de venturibuis (met elektrische drukverschilopnemer) en permanent geregistreerd. Eveneens geregistreerd worden de temperaturen in het reactorvat, de temperatuur van het koelwater bij het verlaten van de primaire koeler en de gemiddelde concentratie van de suspensie in het vat. De voor het laatstgenoemde doel dienende (zeer gevoelige en stabiele) drukverschilopnemer kan naar keuze worden verbonden met de simulator of met het reactorvat zelf. De automatische temperatuurregeling bevindt zich bovenstrooms van het reactorvat. Door de kranen *1* en *2* te openen en de cycloon in werking te stellen, kan men een zeer grote fractie van het aantal UO_2-deeltjes uit de vloeistof verwijderen en verzamelen in het voorraadvat. Door de genoemde kranen te sluiten en *3* en *4* te openen, kan dit vat weer worden leeggespoeld. Met behulp van het doseervat (evenals het voorraadvat afschroefbaar) kan een kleine bekende hoeveelheid UO_2 in het circuit gebracht worden. De spoelwaterstroom wordt gemeten met de druppel-stroommeter *C*. Een gelijke hoeveelheid vloeistof ontwijkt uit het hoofdcircuit via de stijgpijp. Van de uit de stijgpijp stromende vloeistof kunnen de zuurgraad (p_H) en het geleidingsvermogen (mho) gemeten worden. De gehele inhoud van het reactorcircuit kan men zo nodig (na afscheiding van de UO_2-korrels) in het manoeuvreervat laten lopen. Dit vat kan worden leeggeperst met lucht, die via het reduceerventiel R_v wordt onttrokken aan de persluchtleiding die ook de gasbellenpomp in het primaire koelcircuit en de spoelwaterleiding bedient.

11/14/2023

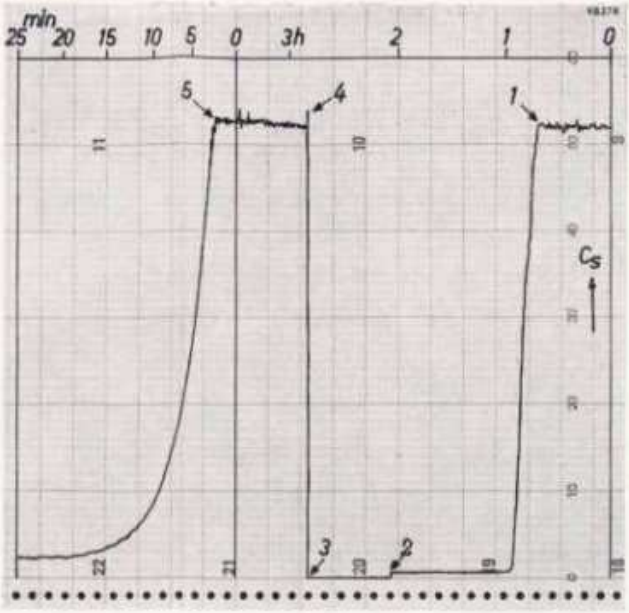


Fig. 22. Registrogram van het tijdsverloop van de gemiddelde concentratie C_S in het reactorvat bij het uitvoeren van verschillende operaties. De tijdschaal loopt van rechts naar links; bij *2* heeft het registreerapparaat twee uur stilgestaan. (*Rectificatie.* De bovenaan bijgeschreven tijden rechts van de verticale streep ongeveer in het midden van de figuur, zijn onjuist. Behoudens de stilstand van twee uur bij *2*, heeft de papierstrook steeds bewogen met de snelheid die beantwoordt aan de tijdschaal aangegeven links van de genoemde verticale streep.) Geheel rechts: normaal stromen van de vloeistof. Bij *1* werd de pomp stilgezet; de concentratie daalde tot nul. Bij *3* werd de pomp weer aangezet; de concentratie steeg zeer snel tot de oorspronkelijke waarde. Bij *4* is het doorschieten van het registreerapparaat te zien. Bij *5* werd de cycloon in werking gesteld. Na 20 minuten had deze 95 % van het UO_2 uit de vloeistof verwijderd.

gebeurlijkheden daarin mogelijk. Iedere grootheid die van belang is (of kan zijn), kan worden gemeten. Door de uitgebreidheid van deze apparatuur blijft de genoemde controle niet beperkt tot het reactorcircuit, maar strekt deze zich ook uit tot de koelcircuits. Een eventueel door vervuiling optredende verslechtering van de warmteafgifte in de koelers b.v. kan geconstateerd worden. Bij de experimenten die tot nu toe zijn uitgevoerd, zijn reeds vele waardevolle gegevens verkregen. Dit is mede te danken aan

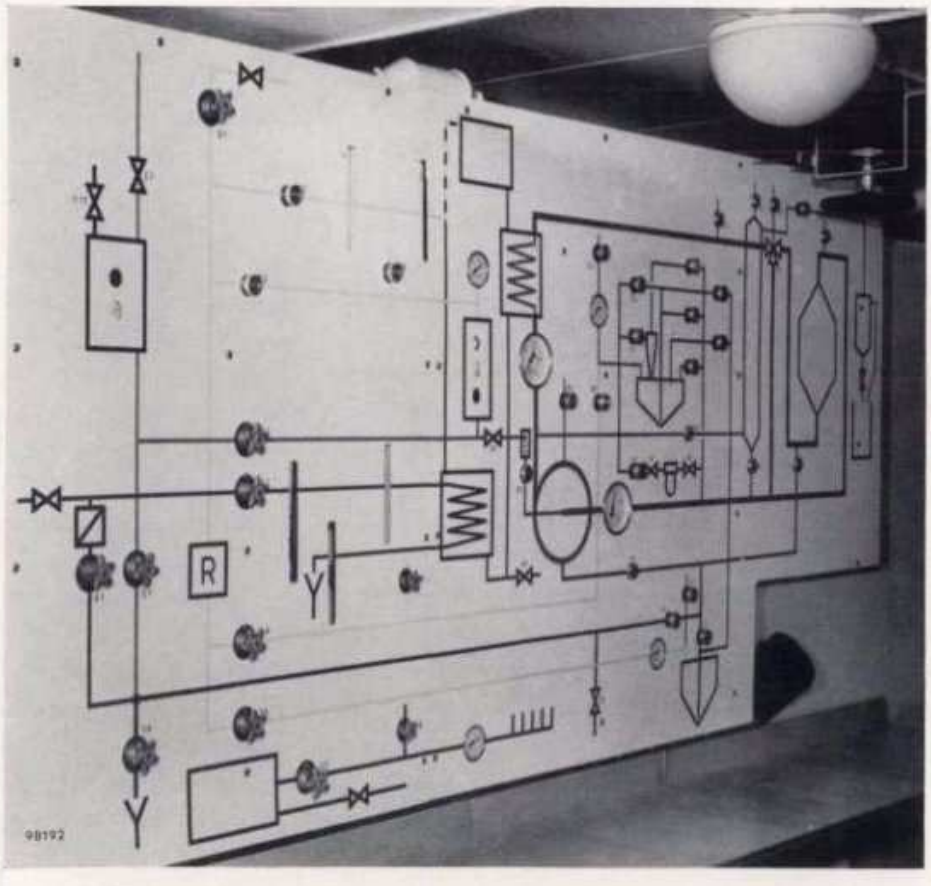


Fig. 23. Het paneel in de bedieningskamer waarop het leidingsschema is geschilderd en waarop zich op de juiste plaats een aantal meters en kranen bevinden (vgl. fig. 21). Met het handwiel (rechts boven) bedient men de kraan waarmee de stroomsnelheid in het reactorvat wordt ingesteld. Het vloeistofniveau in het voorraadvat voor gedestilleerd water en dat in het spoelvat worden gecontroleerd door middel van lampjes. Rechts onder ziet men een periscoop, waarmee een aantal meters in de reactorruimte afgelezen kan worden.

Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

het meten van grootheden die men in vergelijking met de eerste vier die in dit hoofdstuk genoemd werden, als minder belangrijk — maar blijkbaar niet als ònbelangrijk — mag kwalificeren.

Samenvatting. Bij experimenten met de subkritische suspensiereactor te Arnhem is het noodzakelijk dat de temperatuur in het reactorvat alle waarden tussen kamertemperatuur en 100 °C kan hebben en niet meer dan 0,1 °C varieert. Daar de pomp die de suspensie door het reactorcircuit doet circuleren, energie aan de vloeistof toevoert (ca. 5 kW), is bij iedere werktemperatuur koeling noodzakelijk. Daar noch de energietoevoer van de pomp noch de koeling volkomen constant zijn, moet men de temperatuur kunstmatig stabiliseren. Dit geschiedt met behulp van een verhitter (een pijpstuk in het reactorcircuit waardoor een elektrische stroom van maximaal 2500 A vloeit), die bestuurd wordt door een elektrische thermometer en die het bedrag waarmee het koelvermogen het pompvermogen overtreft, juist compenseert. Men stelt het koelvermogen steeds zo in dat bij de gewenste temperatuur de verhitter de helft van zijn maximumvermogen (5 kW) afgeeft. De variatie van het aan de verhitter toegevoerde vermogen geschiedt door variatie van de primaire stroom van de transformator in welks secundaire keten het genoemde pijpstuk is opgenomen, en wel aldus dat de primaire stroom door twee antiparallel geschakelde thyratrons vloeit. Deze worden ontstoken met behulp van een impuls die (in elke periode van de netspanning) vroeger of later optreedt, al naar de suspensie te koud of te warm is. Door deze wijze van ontsteken kan het ontsteekogenblik ook in de tweede helft van de (halve) netperiode vallen en is dus de stroom regelbaar van nul tot de maximumwaarde. Langzame variaties van de temperatuur worden met een factor 8 gereduceerd. Snelle kunnen in de praktijk niet voorkomen. Uit het Nyquist-diagram van de regelapparatuur blijkt dat de installatie stabiel is.

De gemiddelde concentratie van de suspensie in het reactorvat wordt bepaald uit het verschil in hydrostatische druk tussen twee punten die zich op verschillende hoogte bevinden. Bij een vat van cilindrische vorm, waarin de vloeistof relatief rustig stroomt, kan men de verschilmanometer direct op het reactorcircuit aansluiten. Er moet gecorrigeerd worden voor de bijdrage tot het drukverschil die geleverd wordt door het stromen van de vloeistof. Bij een bolvormig vat is de turbulentie te sterk. Hier meet men de concentratie door de manometer aan te sluiten op de wijde buitenbuis van een zg. „reactorsimulator", die zich in een parallel met het reactorvat geschakelde leiding bevindt. In deze verticale buis is de snelheid van de suspensie ongeveer dezelfde als in het reactorvat: de invloed van het uitzakken van de suspensiedeeltjes op de concentratie is in beide ruimten derhalve dezelfde. Deze methode heeft verder het voordeel dat de correctie voor het stromen van de vloeistof hier verwaarloosbaar is. De snelheid van de stroom in het reactorcircuit wordt gemeten met een venturibuis van speciale vorm (kleine stromingsweerstand).

De belangrijkste werkparameters worden geregistreerd in de bedieningsruimte, vele andere kunnen daar op meters worden afgelezen. Van sommige dezer meters bevindt zich een parallelexemplaar in de reactorruimte. De meters voor minder belangrijke of slechts van tijd tot tijd te meten grootheden bevinden zich niet in de bedieningsruimte maar bij de reactor.

Digitized by www.freeservicemanuals.info 2023

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

EEN SYMMETRISCHE MEETLEIDING VOOR METER- EN DECIMETERGOLVEN

621.317.332.1:621.372.2

Impedantiemetingen aan symmetrische meetobjecten (antennes, transformatoren, koppellussen, enz.) verricht men in het ultrakortegolfgebied gewoonlijk met asymmetrische meetapparatuur, met tussenschakeling van stukken die de overgang van symmetrie naar asymmetrie bewerken. Tegen deze inzetstukken bestaan in het algemeen de volgende bezwaren: òf ze hebben een zeer smalle frequentieband en moeten dan voor iedere meetfrequentie uiterst nauwkeurig worden ingesteld (b.v. $\frac{1}{2}\lambda$-stukken), òf ze hebben een brede frequentieband, maar tevens zulke gecompliceerde vierpooleigenschappen dat impedantiemetingen slechts mogelijk zijn indien aan de nauwkeurigheid geen hoge eisen worden gesteld. Voor het nauwkeurig meten van symmetrische impedanties (in het bijzonder reactanties met geringe verliezen) in een betrekkelijk groot frequentiegebied had het dus zin, een symmetrische meetleiding te construeren, waaraan men op bekende wijze met een sonde het verloop van staande golven kan aftasten en daaruit de aangesloten impedantie afleiden.

De dimensionering van zo'n meetleiding is in hoofdzaak bepaald door de volgende overwegingen:

a) De leiding moet afgeschermd zijn, opdat storingen door straling (handeffect) en door opvangen van straling (b.v. bij antennemetingen) zo goed mogelijk worden vermeden.

b) De doorsnede moet van zodanige vorm zijn dat men de golfweerstand van de leiding tevoren uit de geometrie kan berekenen.

c) De golfweerstand moet zo weinig mogelijk afhangen van kleine fouten in de positie van de geleiders.

d) De meetleiding moet aan de zijde van het meetobject met gewone, al of niet afgeschermde, lecherleidingen kunnen worden verlengd, zonder dat aan de overgang reflexies optreden als gevolg van verschillen in de doorsneden.

e) De nuttige lengte van de meetleiding moet groter zijn dan de helft van de grootste golflengte die voorkomt.

De voorwaarden (a-d) wijzen in de richting van een afgeschermde lecherleiding met cirkelvormige doorsnede van binnen- en buitengeleiders (*fig. 1*). De golfweerstand van zo'n leiding kan zeer nauwkeurig worden berekend en vertoont bij gegeven verhouding d/D van de diameters een maximum voor het geval dat de hartafstand a van de binnengeleiders ongeveer de helft is van de binnendiameter D van de buitengeleider. In dat geval zijn de elektrische eigenschappen van de leiding ongevoelig voor kleine fouten in de positie van de binnengeleiders. Daar de golfweerstand geen tevoren gegeven waarde behoefde te hebben, is uit constructieve overwegingen $d = \frac{1}{4}D$ gekozen. Dit laat uit de diameters waarin messingpijp in de handel is, voor d en

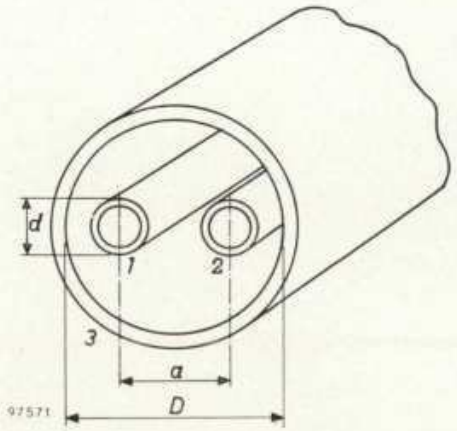


Fig. 1. Lecherleiding *1-2* met buitengeleider (afscherming) *3*. Gekozen verhoudingen van de afmetingen: $a = \frac{1}{2}D$, $d = \frac{1}{4}D$.

D nog een ruime keus. Bovendien is bij deze verhouding de demping van de afgeschermde lecherleiding ongeveer het kleinst. Berekening van de golfweerstand volgens Sommer [1]) levert de waarde 104,7 ohm; met inachtneming van de smalle lengtespleet (zie beneden) wordt dit 105 ohm. (Een ronde getalwaarde van b.v. 100 ohm zou het rekenwerk vergemakkelijkt hebben, maar had tot een te ongunstige diameterverhouding geleid.)

Ten einde te kunnen meten in de gehele ultrakortegolfband II (87-100 MHz, grootste golflengte 3,45 m), hebben we de meetleiding ca. 2 m lang gemaakt; zie bovengenoemd punt (e). De laagste meetfrequentie werd hierdoor ca. 80 MHz. Door voorschakelen van verlengleidingen kan natuurlijk ook bij nog lagere frequenties worden gemeten. Een bovengrens aan de frequentie wordt slechts gesteld door het optreden van golfpijptrillingen en zal hier in de buurt van 1000 MHz liggen.

De uitgevoerde meetleiding (*fig. 2*) bestaat uit een starre messingbuis — 48 mm binnen-, 60 mm buitendiameter —, die als afschermende buitengeleider dient, en uit twee binnengeleiders, eveneens

[1]) F. Sommer, Die Berechnung der Kapazitäten bei Kabeln mit einfachem Querschnitt, Elektr. Nachr.-Techn. **17**, 281-294, 1940.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Digitized by www.freeservicemanuals.info 2023

van messingbuis (10 mm binnen-, 12 mm buitendiameter). De binnengeleiders zijn bevestigd met steunen op onderlinge afstanden van ca. 40 cm; elke steun bestaat uit twee 4 mm dikke bouten van „Teflon" [2]) (polytetrafluorethyleen), die rechthoekig op elkaar in de binnengeleiders zijn geschroefd;

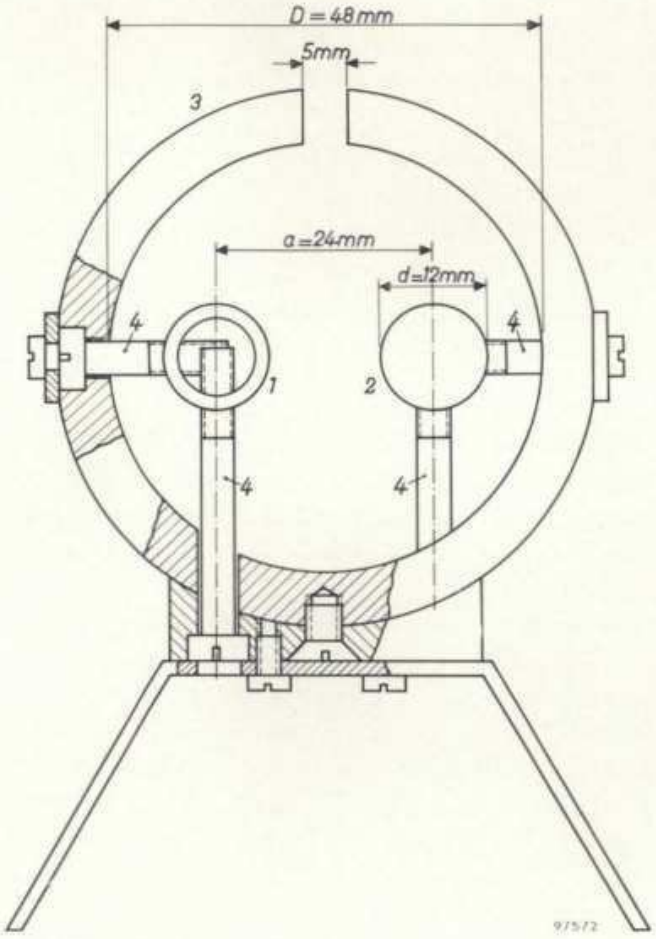


Fig. 2. Dwarsdoorsnede van de meetleiding. *1* en *2* binnengeleiders van messingpijp, gesteund door bouten *4* van „Teflon". *3* buitengeleider van messingpijp, met spleet voor de sonde.

hun koppen zijn gearrêteerd in de buitengeleider. Alleen aan de ingang van de leiding bestaat de steun uit een schijf van „Trolitul", wat op deze plaats toelaatbaar is, omdat hier reflexies onschadelijk zijn. De buitengeleider dient tevens als leibaan voor een wagentje, dat de meetsonde draagt. Hij is over zijn gehele lengte voorzien van een 5 mm brede spleet, waardoorheen de aanstonds te bespreken sonde naar binnen steekt.

Zoals uit fig. 2 is te zien, veroorlooft deze constructie een eenvoudige justering van de binnengeleiders in horizontale en verticale richting; die helft van de ruimte binnen de buitengeleider waarin de sonde zich beweegt, is geheel vrij van storende elementen. Met name de invloed van de steunen op de elektrische eigenschappen van de leiding is op deze wijze verwaarloosbaar klein gehouden. Dit is niet in de laatste plaats te danken aan de geringe diëlektrische constante van de gebruikte kunststof ($\varepsilon_r = 2$). Dit materiaal blijkt ook mechanisch goed te voldoen: na een half jaar gebruik kon generlei vormverandering door kruip geconstateerd worden.

Voor het aansluiten is de meetleiding aan beide einden voorzien van symmetrische flenzen (zie fig. 4) met stekerverbinding voor de binnengeleiders.

Bijzondere aandacht is besteed aan de sonde. In de praktijk moet men bij alle symmetrische leidingssystemen rekening houden met het optreden van asymmetrische golven. Deze ontstaan reeds indien het transmissiesysteem ergens een kleine afwijking van de symmetrie vertoont; bij gunstige resonantievoorwaarden kunnen ze buitengewoon sterk worden. Het gevaar is bijzonder groot bij afgeschermde lecherleidingen, daar deze ook goede transmissie-eigenschappen bezitten als coaxiaal systeem: de binnengeleiders onderling in faze, en met de buitengeleider in tegenfaze.

Voor zover er asymmetrische golven ontstaan als gevolg van asymmetrie van het meetobject zelf, leiden ze onvermijdelijk tot onjuiste meetresultaten. Het is gemakkelijk in te zien dat de symmetrische impedantie van een tweepool via een driegeleidersysteem slechts dan goed kan worden gemeten indien daarbij de derde geleider (buitengeleider) neutraal blijft. Meetfouten van deze soort worden dus vermeden mits men zorgt voor nauwkeurige elektrische — en dat betekent in de meeste gevallen geometrische — symmetrie van de meetobjecten.

Voor zover er echter asymmetrische golven ontstaan door asymmetrieën vóór het meetobject — dus voornamelijk als gevolg van een asymmetrische voedingsspanning —, is hun invloed op het meetresultaat tegen te gaan door het gebruik van een sonde die voor deze golven ongevoelig is. Vanuit dit gezichtspunt is eerst een reeks proeven gedaan met afgestemde sondes, omdat deze ons gunstig toeschenen wegens hun grote gevoeligheid en hun onderdrukking van hogere harmonischen. Daarbij bleek echter dat noch met elektrische, noch met magnetische koppeling de afsteminrichting met redelijke kosten voldoende symmetrisch kon worden gemaakt om in het gehele frequentiegebied de indicatie van asymmetrische golven te onderdrukken. Niet-afgestemde sondes bleken in dit opzicht beter te zijn, doch van deze was de gevoeligheid te gering. Bevredigende resultaten zijn ten slotte verkregen door de gelijkrichtdiode van de sonde

[2]) E. I. du Pont de Nemours.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

direct in het hoogfrequente veld van de meetleiding aan te brengen. In de hoogfrequentiekring van de sonde komen dan alle verbindingen die tot afhankelijkheid van de frequentie en tot asymmetrie aanleiding kunnen geven, te vervallen. Tevens verkrijgt men dan een sonde die in het gehele frequentiegebied gevoelig genoeg en betrekkelijk gemakkelijk symmetrisch te maken is.

De definitieve uitvoering is schematisch weergegeven in *fig. 3*. De aansluitdraadjes van een miniatuur-germaniumdiode type OA 95 vormen een dipool, die zich direct in het veld tussen de beide binnengeleiders bevindt. De stroom wordt afgenomen via twee symmetrisch aangebrachte miniatuurweerstanden, die tevens als hoogfrequentiebelasting van de diode fungeren. Voor het uitzeven van de hoge frequentie dient een symmetrisch laag doorlatend filter, dat uit speciale doorvoercondensatoren en weerstanden bestaat, die organisch één geheel vormen met het pijpje, waarmee de sonde door de spleet gevoerd is.

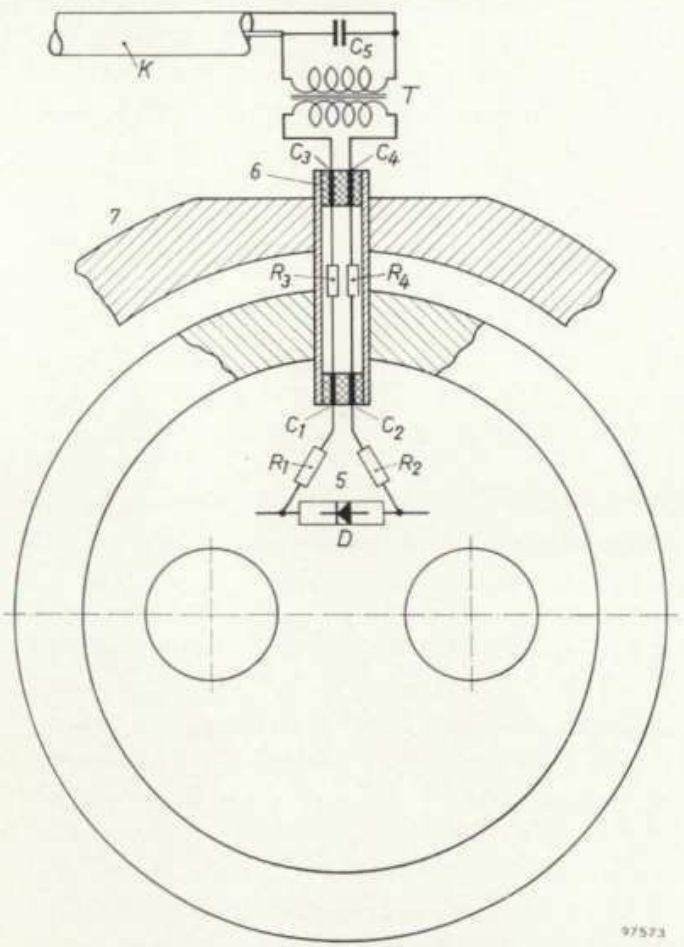


Fig. 3. Schema van de sonde. De eigenlijke sonde *5* is door middel van het pijpje *6* bevestigd aan het wagentje *7*, dat langs de meetleiding verplaatsbaar is. *D* miniatuur-germaniumdiode OA 95. R_1-R_2 miniatuurweerstanden, die de hoogfrequentiebelasting van de diode vormen. De symmetrische doorvoercondensatoren C_1-C_2 en C_3-C_4 vormen met de weerstanden R_3-R_4 een laag doorlatend filter. *T* transformator voor 1000 Hz. C_5 aanpassingscondensator aan de laagfrequentiezijde. *K* kabel naar de indicatieversterker.

Om de indicatie zo gevoelig mogelijk te maken, wordt de hoogfrequente voedingsspanning met 1000 Hz in amplitude gemoduleerd en is in het laagfrequentiegedeelte van de sonde een op 1000 Hz afgestemde transformator opgenomen. Deze zorgt voor de aanpassing op de asymmetrische ingang van de indicatieversterker. Bij een bandbreedte van 8 Hz is deze speciaal voor dit doel ontwikkelde versterker zo gevoelig dat een laagfrequente spanning van 0,5 μV nog met zekerheid afgelezen kan worden.

De totale meetgevoeligheid is op deze wijze zo hoog opgevoerd kunnen worden dat bij een hoogfrequente voedingsspanning van 5 V (over 105 ohm) en een staandegolfverhouding van enige honderden de spanningsminima nog goed te detecteren zijn. Daarmee is praktisch de grens van het mogelijke bereikt, aangezien staandegolfverhoudingen van deze orde van grootte reeds ontstaan door de eigen demping van de meetleiding (bij kortsluiting). Daar echter de sonde een brede frequentieband heeft, vereisen zulke metingen een hoogfrequente voedingsspanning die in hoge mate vrij van hogere harmonischen is.

De mechanische geleiding van de sonde geschiedt door het reeds genoemde wagentje, dat met zes kogelblokken zonder speling over de buitengeleider rolt. Het draagt bovendien een inrichting voor het aflezen van de lengtecoördinaat en een kastje voor de 1000-Hz-transformator met een aansluitbus voor de kabel naar de indicatieversterker. Na zorgvuldig justeren van de binnengeleiders en gunstig oriënteren van de sonde zijn variaties in de indicatie, door fouten in de parallelgeleiding van het wagentje ten opzichte van de binnengeleiders, kleiner dan 2%.

Fig. 4 toont de meetleiding, compleet met de hoogfrequentiegenerator en de indicatieversterker: de voornaamste gegevens zijn samengevat in het onderstaand *overzicht*. De apparatuur wordt tegenwoordig gebruikt in het frequentiegebied van 80 tot 300 MHz.

Overzicht van de voornaamste gegevens der symmetrische meetleiding

Meetleiding:

Golfweerstand	105 ohm ±0,5%.
Eigen demping	bij 100 MHz: 9×10^{-6} Np/cm.
	bij 300 MHz: 16×10^{-6} Np/cm.
Meetlengte	1891 mm.

Sonde:

Variatie in gevoeligheid tussen 80 en 300 MHz . .	< 2 : 1.
Verstoring door sonde in het hoogfrequente veld, in maximum van staande golf	< 1%.

Diodekarakteristiek kwadratisch tot een laagfrequente indicatiespanning van ca. 1 mV.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

Digitized by www.freeservicemanuals.info 2023

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Digitized by www.freeservicemanuals.info 2023

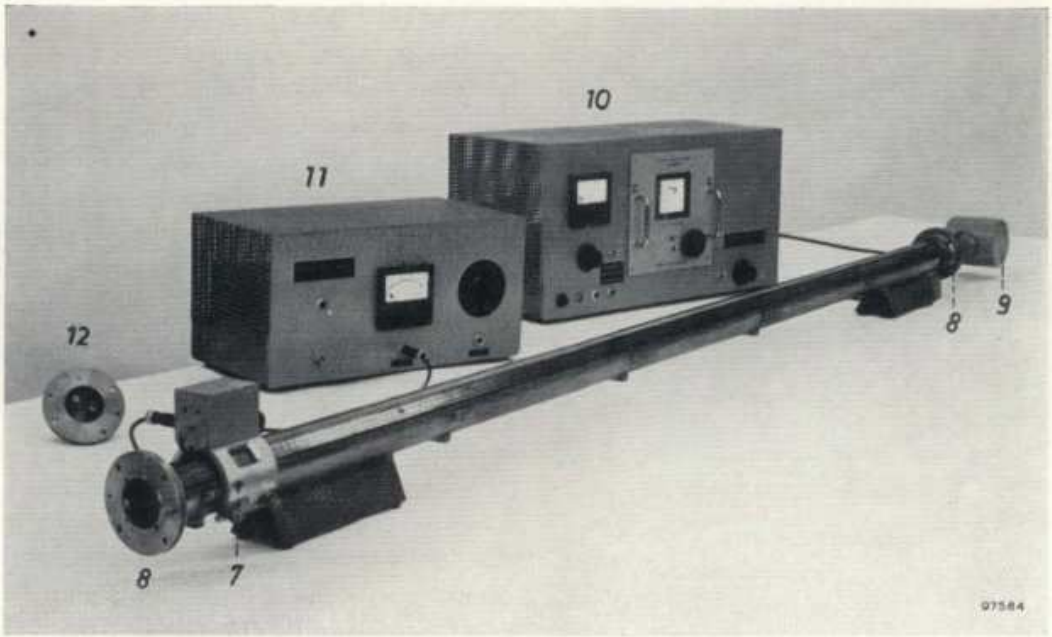


Fig. 4. De complete meetinrichting. Vooraan de meetleiding met flensverbindingen *8* en overgangsstuk asymmetrisch-symmetrisch *9*. Links op de meetleiding het op kogels rollende wagentje *7*. Daarachter de generator *10*, de indicatieversterker *11* en een symmetrische afsluitweerstand *12* van 105 ohm.

Gelijkmatigheid in lengterichting: Door mechanische toleranties van de leiding en de sondegeleiding, en door inhomogeniteiten zoals steunen en verbindingsstukken, ontstaan ongelijkmatigheden in de lengterichting. Hun invloed op spannings- en lengtemeting is als volgt bepaald. Bij reflexievrije afsluiting met een symmetrische weerstand van 105 ohm varieert de geïndiceerde spanning over de totale lengte van de meetleiding max. 2%. Bij afsluiting met een verschuifbare kortsluiting verplaatsen de spanningsknopen zich max. ± 1 mm. De absolute nauwkeurigheid bij impedantiemetingen kan van geval tot geval uit deze gegevens worden afgeleid.

Hoogfrequentiegenerator:

Frequentiegebied	80-300 MHz.
Uitgangsvermogen	1 W in asymmetrische weerstand van 60 ohm.
Hogere harmonischen . .	$< 1\%$.
Modulatiefrequentie . . .	1000 Hz $\pm$ 1 Hz.
Modulatiediepte	$> 80\%$.

De hoogfrequentie-energie wordt aan de meetleiding toegevoerd via een conisch overgangsstuk asymmetrisch-symmetrisch, met grote bandbreedte.

Indicatorversterker:

Frequentieband	1000 Hz $\pm$ 4 Hz.
Ingangsweerstand	100 kΩ.
Meetgebieden	12 meetgebieden met volle uitslag bij 3 μV tot 1 V.
Ruisspanning	$< 0{,}15$ μV.

Toebehoren:

Voor het aansluiten van meetobjecten op de meetleiding zijn verlengingsleidingen voorhanden zowel als tussenstukken voor het overgaan op kleinere doorsneden. Bij zorgvuldige constructie en correctie van de steunen veroorzaken deze hulpstukken geen meetbare reflexie- of symmetriefouten.

G. SCHIEFER *).

*) Zentrallaboratorium Allgemeine Deutsche Philips Industrie G.m.b.H., Laboratorium Aken.

EEN SCHIJFTRIODE IN METAAL-KERAMIEKUITVOERING VOOR FREQUENTIES TOT 6000 MHz

621.385.3.029.64

In aansluiting op de ontwikkeling van de schijftriode EC 59 [1]) heeft men gezocht naar een gedeeltelijk keramische schijftriode voor cm-golven. De vervolmaking van de techniek voor het solderen van metaal aan keramiek heeft het mogelijk gemaakt, elektrisch zeer goede trilholten te vervaardigen. Ook zijn het uitgangsvermogen en de grensfrequentie — voor zover deze laatste bepaald wordt door de geometrie van de buis — van buizen met roosterbesturing opgevoerd kunnen worden door het glas te vervangen door keramiek. Op deze wijze is nu een nieuwe schijftriode vervaardigd (*fig. 1*), die de voorlopige typeaanduiding OZ 92 heeft gekregen en die geschikt is voor frequenties tot 6000 MHz. De anodegelijkspanning bedraagt 500 V,

[1]) V. V. Schwab en J. G. van Wijngaarden, De EC 59, een zendtriode met 10 W vermogen bij 4000 MHz, Philips techn. T. **20**, 295-304, 1958 (no. 10).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Fig. 1. De experimentele schijftriode OZ 92 in metaal-keramiekuitvoering (links) en de schijftriode EC 59 in metaal-glasuitvoering (rechts).

de anodedissipatie 125 W. De buis kan zowel met water als met lucht worden gekoeld. Het uitgangsvermogen is bij 5000 MHz meer dan 10 W. De buis is nog niet in de handel verkrijgbaar.

De eisen die bij zeer hoge frequenties aan buizen met roosterbesturing worden gesteld, zijn in het algemeen: kleine elektrodeafstanden (geringe looptijdeffecten), grote steilheid, kleine buiscapaciteiten (grote specifieke elektrodebelasting) en sterke ontkoppeling van rooster-anode- en rooster-katodekring door middel van een zo ideaal mogelijk stuurrooster (grote versterking). Overigens bevinden schijftriodes zich steeds geheel in de trilholten, waardoor de vorm van de buiswand de afstemmogelijkheden van die trilholten beïnvloedt. Door geschikte vormgeving kan men de bovengrens van het nuttige frequentiegebied aanzienlijk wijzigen.

Als constructiemateriaal voor buiswanden bezit aluminiumoxyde grote voordelen. Deze bestaan voornamelijk in de grote thermische belastbaarheid van metaal-keramieklassen en in de ook bij hoge temperaturen kleine diëlektrische verliezen van Al_2O_3. Als aan het keramiek te lassen metaal komt een ijzer-nikkel-kobaltlegering in aanmerking. Zilver of zilverlegeringen met koper en andere metalen dienen als soldeer. De technologie van het metaal-keramieklassen is thans zo ver gevorderd dat de soort verbinding die gemaakt wordt — vlakke las of kraaglas — geen essentiële invloed heeft op de vacuümdichtheid en stevigheid ervan. Dientengevolge kan de ontwerper van een schijftriode in metaal-keramiekuitvoering, niet gehinderd door technologische beperkingen, van alle mogelijkheden ter verbetering van de buiswand gebruik maken.

De wand van de OZ 92 is volgens het constructievoorbeeld van *fig. 2* verwezenlijkt, waarbij is uitgegaan van de volgende overwegingen. De genoemde uitvoering maakt in de eerste plaats verzonken montage van de buis in de gebruikelijke golfgeleiderstukken mogelijk, en in de tweede plaats kan men, door de geringe uitzetting van het anodegedeelte van de wand, nog goed op hoge frequenties afstemmen. Voorbeelden van deze uitvoering zijn o.a. de schijftriodes EC 156 en EC 157 [2]) en de reeds genoemde EC 59 [1]).

Van de EC 59 zijn voor de OZ 92 de elektrodeafmetingen en -afstanden, alsmede de statische instelling overgenomen. Daarmee ligt de grensfrequentie van het elektrodesysteem vast, voor zover deze bepaald wordt door afstanden en diameters van de elektrodes. Met inachtneming van de gekozen grensfrequentie volgen de uitwendige afmetingen van de buis hoofdzakelijk uit twee voorwaarden:

1) De trilholte moet in de grondtrilling trillen (E_{010}-resonantie van de capacitief belaste cilindrische trilholte).

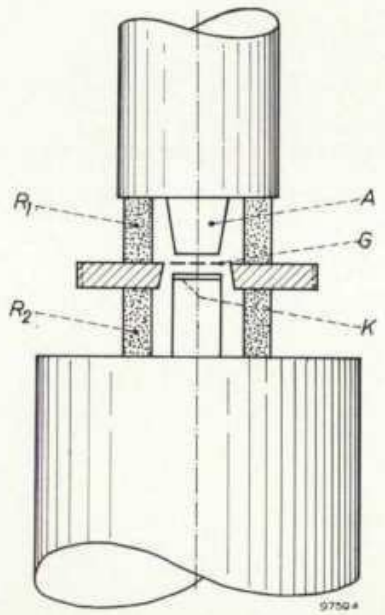


Fig. 2. Schema van de schijftriode OZ 92. *K* katode. *G* rooster. *A* anode. R_1 en R_2 keramische ringen.

[2]) De buizen EC 156 en EC 157 onderscheiden zich van de oudere typen EC 56 en EC 57 door een katode met langere levensduur. De EC 57 is beschreven in Philips techn. T. **18**, 321, 1956.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

2) Het oppervlak van de buiswand waar hoogfrequente stroom loopt, moet in verhouding tot de totale oppervlakte van de trilholte zo klein mogelijk worden gemaakt.

De tweede voorwaarde is een gevolg van het feit dat in de wanden van een capacitief belaste E_{010}-trilholte nabij de as slechts zwakke stromen vloeien, zodat zelfs een slecht geleidingsvermogen van het materiaaloppervlak daar geen grote verliezen in de wand veroorzaakt; tevens is hier de invloed van eventuele contactplaatsen gering. Aan de andere kant kunnen de jouleverliezen in delen van de trilholte ver van de as tot een minimum worden gereduceerd door verbetering van het oppervlak (verzilveren, polijsten). De kwaliteitsfactor van een trilholte hangt af van de vorm en van de elektrische verliezen. Voor de berekening neemt men de E_{010}-trilling aan als grondtrilling. De kwaliteitsfactor van een dergelijke trillingskring is optimaal indien de hoogte ongeveer de helft bedraagt van de diameter. Met deze uitgangspunten kan men de geometrische afmetingen berekenen. Bij de gegeven waarden van de afstand rooster-anode en van de anodediameter vindt men zo voor 5000 MHz de afmetingen, vermeld in het onderschrift van *fig. 3*.

De voor de buiswand gekozen keramische ringen hebben een buitendiameter van 11,6 mm, een dikte van 1,6 mm en een hoogte van 6 mm. Deze afmetingen zijn het resultaat van een compromis tussen de eis, een zo klein mogelijke buis te maken, en het feit dat het keramische materiaal, ten gevolge van zijn grote diëlektrische constante ($\varepsilon_r = 10$), de trillingskring bij kleine afmetingen zeer sterk capacitief zou belasten, hetgeen de kwaliteitsfactor van de anodetrilholte aanzienlijk zou verlagen. Bij de genoemde afmetingen bedraagt de grensfrequentie van de gerede buiswand aan de rooster-anodekant 6500 MHz.

Ten einde een minimale oppervlakte van de trilholte te verkrijgen, heeft men in de buis alle uitspringende hoeken, uitstekende metalen delen en dergelijke inhomogeniteiten zo veel mogelijk vermeden. De grote jouleverliezen van de gebruikte Fe-Ni-Co-legering worden overal door vergulden van het oppervlak (3 tot 5 μ) geëlimineerd. Door deze maatregelen bedraagt de gemeten kwaliteitsfactor van een onbelaste rooster-anodetrilholte als die van fig. 3, bij gebruik van gerede buiswanden, bij 5000 MHz ca. 500. Deze waarde is ongeveer het dubbele van die van buizen met glazen wand, en brengt voor de gebruikelijke toepassingen een verhoging van het kringrendement van ca. 10% mee.

De triode OZ 92 bestaat uit vier samenstellen (*fig. 4a, b, c, d*), met in totaal slechts 15 onderdelen

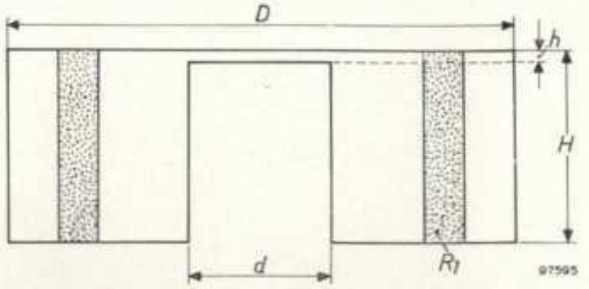


Fig. 3. Anodetrilholte van een schijftriode met keramische ring R_1, in lengtedoorsnede (schematisch). De kwaliteitsfactor van de trilholte is optimaal als $H \approx \frac{1}{3}D$. Voor de 5000-MHz-trilholte van de OZ 92 zijn de volgende afmetingen gekozen: $H = 6$ mm, $D = 16$ mm, $h = 0{,}30$ mm, $d = 4{,}5$ mm.

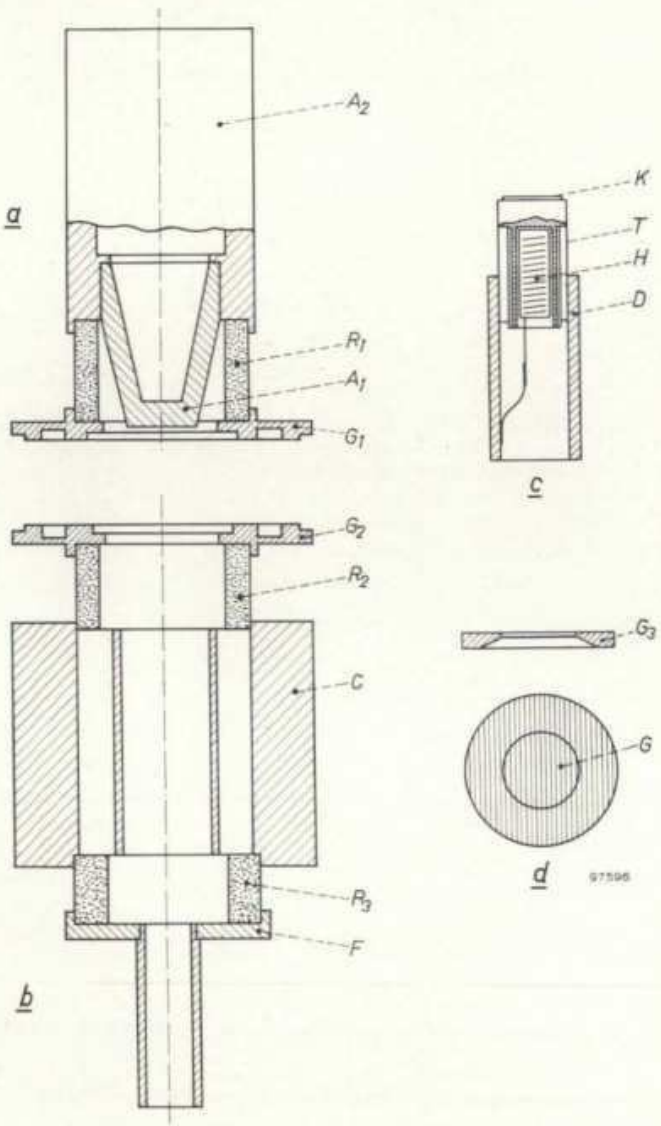


Fig. 4. De vier samenstellen waaruit de OZ 92 bestaat.
a) Anodesamenstel, met anode $A_1 + A_2$, keramische ring R_1 en bovenste deel G_1 van de roosterschijf. Het deel A_1 van de anode is van molybdeen, het deel A_2 van een ijzer-nikkel-kobaltlegering.
b) Uitwendig katodesamenstel, met onderste deel G_2 van de roosterschijf, keramische ringen R_2 en R_3, buitenste katodebus C en gloeidraadaansluiting F.
c) Inwendig katodesamenstel, met naleveringskatode K, gloeidraad H, tantalen cilinder T en binnenste katodebus D.
d) Roostersamenstel, met rooster G van dun wolfraamdraad, dat op de ring G_3 is gewikkeld.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

Digitized by www.freeservicemanuals.info 2023

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

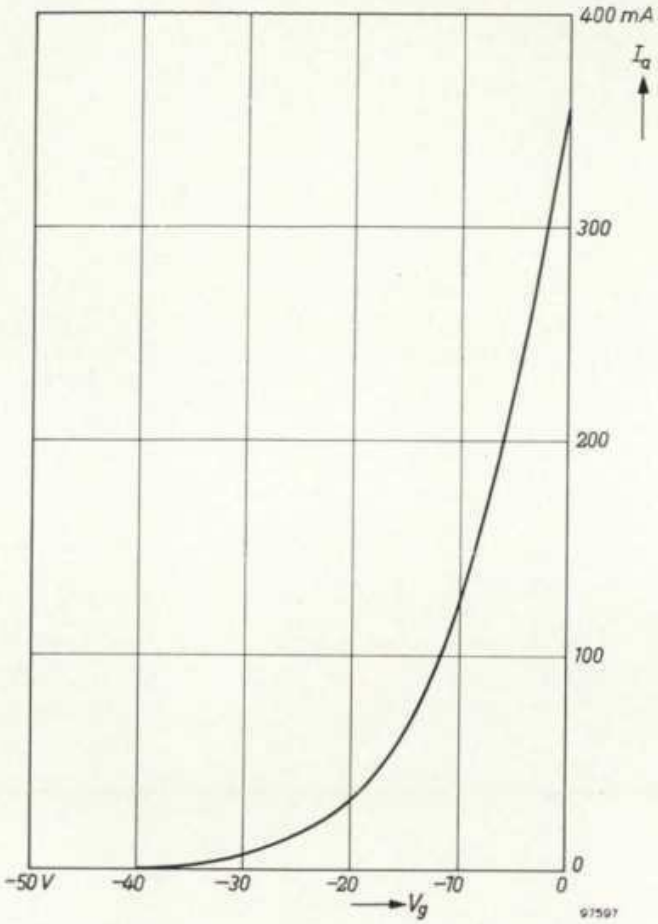


Fig. 5. Statische karakteristiek van de OZ 92: anodestroom I_a als functie van de roosterspanning V_g, bij 500 V anodegelijkspanning en 6,3 V gloeispanning.

(overeenkomstige buizen met glazen wand bestaan uit ca. 30 onderdelen). Alle montagehandelingen zijn eenvoudig en kunnen door enigszins geschoold personeel, voorzien van simpele hulpmiddelen en mallen, met de noodzakelijke nauwkeurigheid worden uitgevoerd. Deze vereenvoudiging van constructie en vervaardiging is voor een deel te danken aan de grote vormvastheid van het keramische materiaal, d.w.z. aan het ontbreken van een plastische toestand in het temperatuurgebied beneden 1000 °C.

Het anodesamenstel (fig. 4*a*) bestaat uit de anode, een keramische ring en het bovenste deel van de roosterschijf, welke laatste tweedelig is (het onderste deel behoort tot het uitwendige katodesamenstel). Deze tweedeligheid vergemakkelijkt het stellen der elektrodeafstanden, het reinigen van de inwendige buisoppervlakken en de nabehandeling van de roosterzitting. Uit technologische overwegingen bestaat ook de anode uit twee delen, omdat de gebruikte Fe-Ni-Co-legering niet de hoge thermische belasting (1,9 kW/cm²) verdraagt waaraan de eigenlijke anode bij het ontgassen aan de pomp moet worden blootgesteld. Dit laatste deel van de anode is van molybdeen. Anode en roosterschijf hebben

Tabel I. Statische instelling en andere gegevens van de OZ 92.

Gloeispanning V_f . 6,3 V	Steilheid S . . ca. 17 mA/V
Anodegelijkspanning V_a . . . . . 500 V	Versterkingsfactor μ . . ca. 28
Anodegelijkstroom I_a . . . . . 250 mA	Buiscapaciteiten:
Roostervoorspanning V_g . . . . . −5 V	C_{gk} = 3,3 pF
Anodedissipatie P_a . 125 W	C_{ag} = 1,9 pF
	C_{ak} = 0,048 pF

een kraag (0,8 mm hoog, 0,3 mm dik) als vatting voor de keramische ring. Deze kraag maakt de buis steviger zonder de jouleverliezen noemenswaardig te vergroten.

Fig. 4*b* toont het uitwendige katodesamenstel. Het bestaat uit het onderste deel van de roosterschijf, een tweede keramische ring, de buitenste katodebus, een derde keramische ring en de concentrische gloeidraadaansluiting. De metaal-keramieklassen van dit samenstel komen overeen met die van het anodesamenstel. In de buitenste katodebus past het inwendige katodesamenstel (fig. 4*c*). Dit wordt gevormd door de binnenste katodebus, die de naleveringskatode draagt. Deze is omgeven door een cilinder van tantaal, die de katode aan de omtrek afsluit, verdamping van het barium naar de roosterkatoderuimte tegengaat en tevens als gasbinder dient.

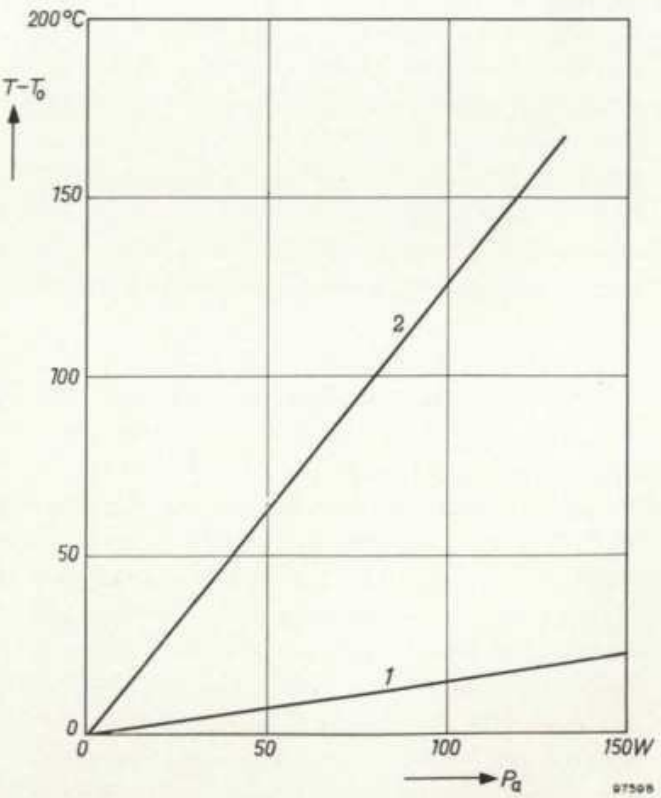


Fig. 6. Temperatuurverschil $T - T_0$ tussen de anode-keramieklas en zijn omgeving, als functie van de anodedissipatie P_a. Kromme *1*: waterkoeling (0,5 l/min), kromme *2*: luchtkoeling (40 l/min).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Digitized by www.freeservicemanuals.info 2023

In fig. 4*d* is het roostersamenstel getekend, nl. het met dun wolfraamdraad bewikkelde roosterraam. Dit is een ring, die de samenstellen *a* en *b* centreert en waarvan de dikte de afstand roosterkatode bepaalt. Bij de eindmontage worden deze samenstellen door snelsolderen (in zo korte tijd dat de dunne roosterdraden zich niet ontoelaatbaar ontspannen) aan de omtrek van de roosterschijf met elkaar verbonden.

De statische instelling en andere gegevens van de OZ 92 zijn samengevat in *tabel I*. *Fig. 5* toont de statische karakteristiek van een gemiddeld buisexemplaar.

Door de goede warmtegeleiding van Al_2O_3 en door het ontbreken van elektrolyse, ook bij hoge temperaturen, kan de OZ 92 thermisch zeer sterk belast worden. De temperatuur van de lasplaatsen mag echter niet hoger worden dan 250 °C (bij de EC 59 mag het temperatuurverschil tussen lasplaats en omgeving max. 120 °C bedragen). Aan deze eis kan men voldoen met waterkoeling, maar ook met luchtkoeling. *Fig. 6* geeft het met experimentele koelinstallaties bereikte temperatuurverschil tussen een lasplaats en zijn omgeving als functie van de anodedissipatie. De temperatuur is gemeten in de onmiddellijke omgeving van de metaal-keramieklas aan de anodezijde.

Een andere gunstige eigenschap van de buis is de ongevoeligheid voor snelle temperatuurveranderingen. Deze is te danken aan het feit dat de uitzettingscoëfficiënten van Al_2O_3 en de gebruikte Fe-Ni-Co-legering praktisch gelijk zijn.

De buis kan zowel in versterker- als in oscillatorschakeling werken tot 6000 MHz. *Fig. 7* is een foto van de gebruikte meetopstelling met de OZ 92 als oscillatorbuis. De oscillator is daarbij van het zg. „re-entrant"-type (*fig. 8*), waarbij de frequentie wordt gewijzigd door een andere anodetrilholte te nemen. *Tabel II* geeft enkele met deze oscillator verkregen resultaten.

Het uitgangsvermogen van de oscillator neemt aan beide kanten van het frequentiegebied om 5000 MHz af. Vermoedelijk is daarbij de afneming naar

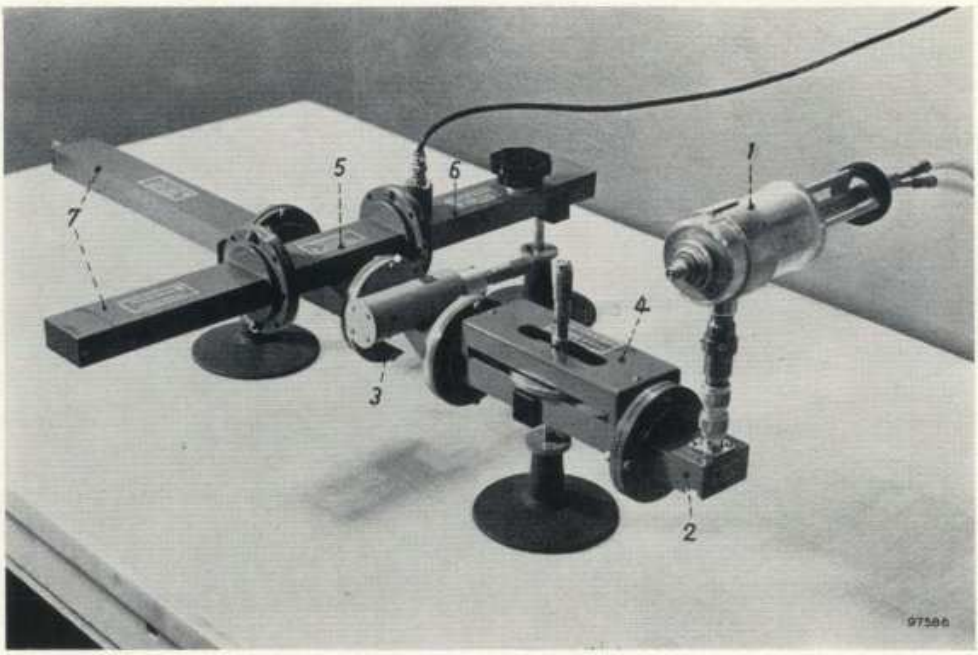


Fig. 7. Meetopstelling met de OZ 92 in een oscillator. De foto toont de oscillator *1* (vgl. fig. 8) en de tot de meetopstelling behorende golfgeleiderdelen: een overgangsstuk *2*, een frequentiemeter *3*, een aanpasstuk *4*, een kruiskoppeling *5*, een thermistorafsluiting *6* en een aanpasweerstand *7* voor de G-band (3950-5850 MHz).

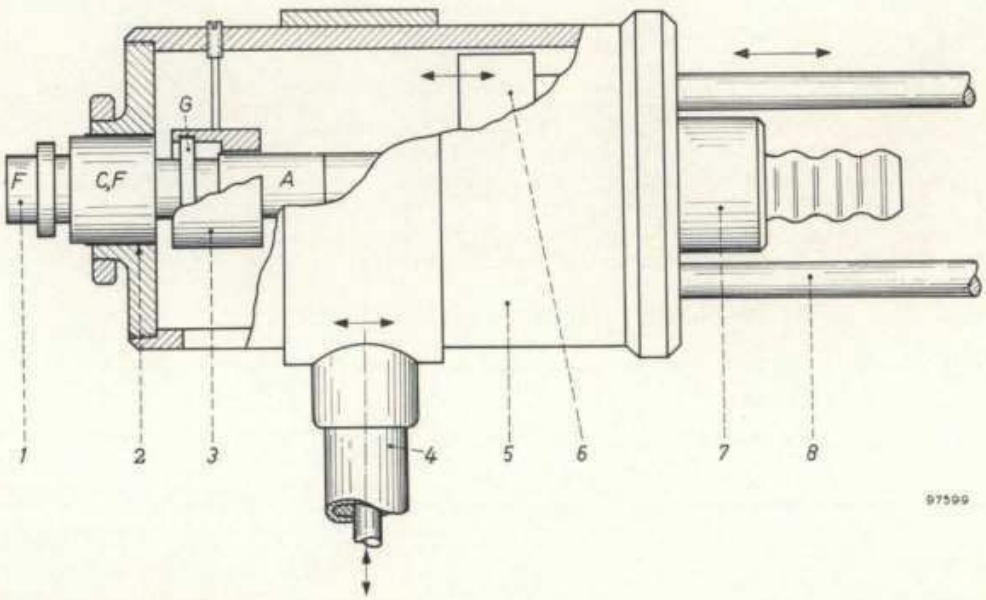


Fig. 8. Oscillator van het zg. „re-entrant"-type met de OZ 92. *1* schijftriode OZ 92. *2* overbruggingscondensator. *3* cilindrische bus als anodetrilholte. *4* axiaal en radiaal verschuifbare energieafnemer. *5* omhulling, tevens roosteraansluiting. *6* verplaatsbare zuiger (niet in contact met *5*). *7* koelleiding, tevens anodeaansluiting. *8* leistang van de afstemzuiger.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Tabel II. Experimentele resultaten, verkregen met een OZ 92 in een oscillator met 500 V anodegelijkspanning.

Frequentie f	(MHz)	4740	4980	4990	5470	5530
Uitgangsvermogen P_o .	(W)	7,1	12,4	13,2	4,8	6,9
Anodegelijkstroom I_a .	(mA)	235	255	320	196	290
Roostervoorspanning V_g	(V)	–25	–17,5	–28	–31	–5
Roostergelijkstroom I_g	(mA)	30	20	33	19	23

hogere frequenties een gevolg van de buiseigenschappen, en wordt de afneming naar lagere frequenties veroorzaakt door de eigenschappen van de gebruikte oscillator.

EC 59; ten gevolge van zijn afwijkende vorm is hij echter niet zonder meer met de EC 59 te verwisselen. *Fig. 9* toont een eenvoudige versterker, bestemd voor opneming in een golfgeleiderketen.

Resumerend kunnen we zeggen dat de voordelen van de OZ 92 te danken zijn aan de eigenschappen van het Al_2O_3, die gunstiger zijn dan die van glas. Deze voordelen zijn:

1) Grotere thermische belastbaarheid van de buis door groot warmtegeleidingsvermogen van het keramiek. Ook bij hoge temperaturen treedt in het keramiek geen elektrolyse op.

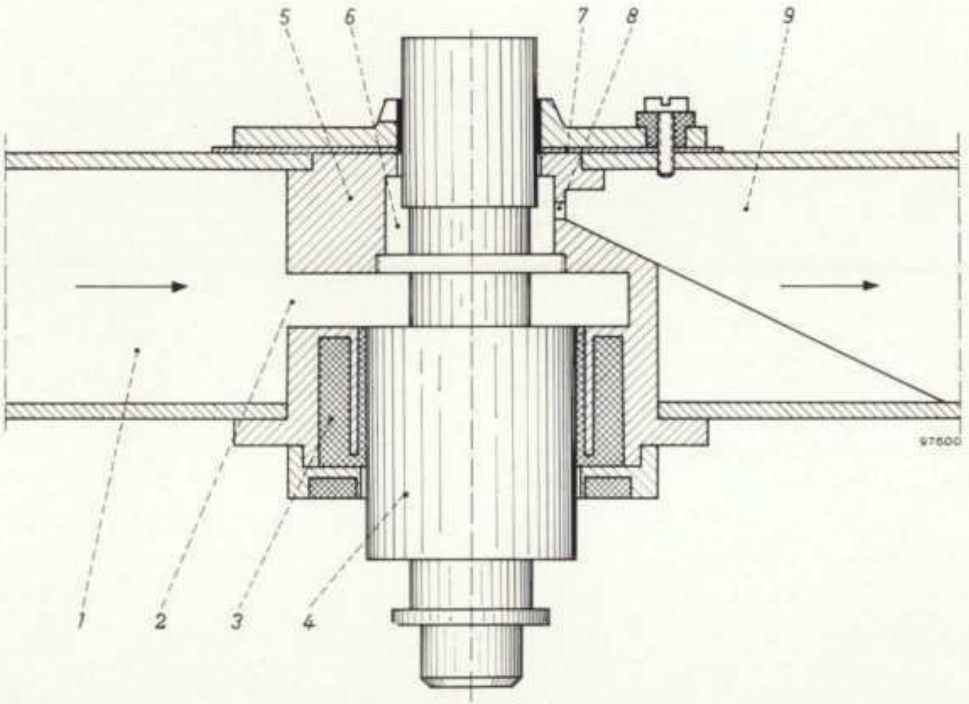


Fig. 9. Principeschema van een versterker met OZ 92 (lengtedoorsnede), opgenomen in een golfgeleiderketen. *1* ingang van de versterker. *2* ingangskring. *3* „choke". *4* schijftriode OZ 92. *5* versterkerblok. *6* anodetrilholte. *7* overbruggingscondensator. *8* koppelspleet. *9* uitgangsgolfgeleider.

De gemeten waarden van het uitgangsvermogen in de oscillator — nl. 13 W bij 5000 MHz en ca. 7 W bij 5500 MHz, overeenkomend met rendementen van ca. 9% resp. 5% — tonen aan dat de OZ 92 bij deze frequenties nog geheel bevredigend werkt.

De buis is echter niet in de eerste plaats bedoeld als oscillator, maar — evenals de EC 59 — als vermogenversterker. Hij zou b.v. met voordeel in de G-band (3950-5850 MHz) gebruikt kunnen worden. Zijn elektrisch gedrag lijkt op dat van de

2) Dank zij de geringe diëlektrische verliezen in het keramiek kan men grotere kwaliteitsfactoren van de trilholten bereiken.
3) De grote vormvastheid van het keramiek, ook bij hoge temperaturen, maakt een eenvoudige constructie met in totaal slechts 15 onderdelen mogelijk.

E. MENTZEL *) en H. STIETZEL *).

*) Ontwikkellaboratorium van de Valvo G.m.b.H., Radioröhrenfabrik, Hamburg.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!